

SÉRIE A, N° 2012

N° D'ORDRE :

2879

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

ANDRÉ FRÉON

---

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — SUR LE COMPORTEMENT DANS L'ATMOSPHÈRE DES  
MÉSONS, PARTICULES COMPOSANT LA PARTIE  
PÉNÉTRANTE DES RAYONS COSMIQUES.

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — LES ORAGES MAGNÉTIQUES, THÉORIE DE CHAPMAN  
ET FERRARO, LEUR CORRÉLATION AVEC L'INTEN-  
SITÉ DU RAYONNEMENT COSMIQUE.

Soutenues le 12 Novembre 1942 devant la Commission d'examen.

MM. GEORGES BRUHAT. *Président.*

J. COULOMB .... }  
A. KASTLER..... } *Examineurs.*

---

MASSON ET C<sup>IE</sup>, ÉDITEURS

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS, VI<sup>e</sup>

1942



SÉRIE A, N° 2012

N° D'ORDRE :

2879

---

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**ANDRÉ FRÉON**

---

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — SUR LE COMPORTEMENT DANS L'ATMOSPHÈRE DES  
MÉSONS, PARTICULES COMPOSANT LA PARTIE  
PÉNÉTRANTE DES RAYONS COSMIQUES.

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — LES ORAGES MAGNÉTIQUES, THÉORIE DE CHAPMAN  
ET FERRARO, LEUR CORRÉLATION AVEC L'INTEN-  
SITÉ DU RAYONNEMENT COSMIQUE.

Soutenues le 12 Novembre 1942 devant la Commission d'examen.

MM. GEORGES BRUHAT. *Président.*

J. COULOMB ....

A. KASTLER.....

} *Examineurs.*

---

MASSON ET C<sup>IE</sup>, ÉDITEURS

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS, VI<sup>e</sup>

1942

---

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

*Doyens honoraires* .... { M. MOLLIARD.  
C. MAURAIN.

*Doyen* ..... P. MONTEL, *Professeur*, Théorie des Fonctions.

|                         |   |                 |                |              |
|-------------------------|---|-----------------|----------------|--------------|
| Professeurs honoraires. | { | LÉON BRILLOUIN. | G. BERTRAND.   | GAULLERY.    |
|                         |   | AUGER.          | Ch. FABRY.     | E. CARTAN.   |
|                         |   | DANGEARD.       | LÉON BERTRAND. | E. BOREL.    |
|                         |   | LESPIEAU.       | WINTREBERT.    | A. COTTON.   |
|                         |   | VESSIOT.        | DUBOSQ.        | J. DRACH.    |
|                         |   | PORTIER.        | BOHN.          | M. GUICHARD. |
|                         |   | LAPICQUE.       | RABAUD.        | LABROUSTE.   |

## PROFESSEURS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Charles PÉREZ. . . T Zoologie.</p> <p>L. BLARINGHEM. . . T Botanique.</p> <p>G. JULIA. . . . . T Analyse supérieure.</p> <p>C. MAUGUIN. . . . . T Minéralogie.</p> <p>A. DENJOY. . . . . T Géométrie supérieure.</p> <p>L. LUTAUD. . . . . T Géographie physique et géologie dynamique.</p> <p>G. BRUHAT. . . . . T Physique.</p> <p>E. DARMOIS. . . . . T Enseignement de Physique.</p> <p>A. DEMIÈRE. . . . . T Physique Générale et Radioactivité.</p> <p>L. DUNOYER. . . . . T Chimie-Physique.</p> <p>M. JAVILLIER. . . . . T Chimie biologique.</p> <p>Henri VILLAT. . . . . T Mécanique des fluides et applications.</p> <p>Ch. JACOB. . . . . T Géologie.</p> <p>P. PASCAL. . . . . T Chimie générale.</p> <p>M. FRÉCHET. . . . . T Calcul des probabilités et Physique Mathématique.</p> <p>E. ESCLANGON. . . . . T Astronomie.</p> <p>H. BEGHIN. . . . . T Mécanique physique et expérimentale.</p> <p>Foch. . . . . T Mécanique expérimentale des fluides.</p> <p>PAUTHENIER. . . . . Recherches physiques</p> <p>De BROGLIE. . . . . T Théories physiques.</p> <p>CHRÉTIEN. . . . . Optique appliquée.</p> <p>PRENANT. . . . . T Anatomie et Histologie comparées.</p> <p>VILLEY. . . . . Mécanique physique et expérimentale.</p> <p>COMBES. . . . . T Physiologie végétale.</p> <p>GARNIER. . . . . T Application de l'analyse à la géométrie.</p> <p>PÉRES. . . . . T Mécanique rationnelle.</p> <p>HACKSPILL. . . . . T Chimie minérale.</p> <p>TOUSSAINT. . . . . Technique aéronautique.</p> <p>M. CURIE. . . . . Physique (P. C. B.).</p> | <p>G. RIBAUD. . . . . T Hautes températures.</p> <p>CHAZY. . . . . T Mécanique analytique</p> <p>GAULT. . . . . Chimie (P. C. B.).</p> <p>CROZE. . . . . T Physique théorique. Physique céleste.</p> <p>DUPONT. . . . . T Théories chimiques.</p> <p>VALIRON. . . . . T Calcul différentiel et intégral.</p> <p>BARRABÉ. . . . . Géologie structurale et géologie appliquée.</p> <p>MILLOT. . . . . Biologie animale (P.C.B.).</p> <p>F. PERRIN. . . . . Théories physiques.</p> <p>VAVON. . . . . T Analyse et mesures chimiques.</p> <p>G. DARMOIS. . . . . T Mathématiques générales.</p> <p>CHATTON. . . . . T Biologie maritime.</p> <p>AUBEL. . . . . Chimie biologique.</p> <p>Jacques BOURCART. . . . . Géographie physique et Géologie dynamique.</p> <p>M<sup>me</sup> JOLIOT-CURIE. . . . . Physique générale et Radioactivité.</p> <p>PLANTEFOL. . . . . T Botanique.</p> <p>CABANNES. . . . . T Recherches physiques.</p> <p>GRASSÉ. . . . . T Zoologie. Évolution des êtres organisés.</p> <p>PRÉVOST. . . . . Chimie organique.</p> <p>BOULIGAND. . . . . Mathématiques.</p> <p>CHAUDRON. . . . . Chimie (P. C. B.).</p> <p>WYART. . . . . Minéralogie.</p> <p>TEISSIER. . . . . Zoologie.</p> <p>MANGENOT. . . . . Biologie végétale (P.C.B.).</p> <p>P. AUGER. . . . . Physique.</p> <p>MONNIER. . . . . Physiologie générale.</p> <p>PIVETEAU. . . . . Géologie.</p> <p>ROCARD. . . . . Physique.</p> <p>H. CARTAN. . . . . Calcul Différentiel.</p> <p>SCHAEFFER. . . . . Physiologie générale.</p> <p>LAFFITTE. . . . . Chimie (P. C. B.).</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Secrétaire..... A. PACAUD.

Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.



A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE

EN SOUVENIR DE PAUL EHRENFEST

# TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                                                                      | Pages |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| INTRODUCTION . . . . .                                                                                                                               | I     |
| CHAPITRE PREMIER. — <i>Mesures préliminaires</i> . . . . .                                                                                           | 4     |
| 1 <sup>o</sup> Expérience initiale . . . . .                                                                                                         | 4     |
| 2 <sup>o</sup> Appareil utilisé . . . . .                                                                                                            | 5     |
| 3 <sup>o</sup> Mesures préliminaires . . . . .                                                                                                       | 6     |
| 4 <sup>o</sup> Deuxième série de mesures préliminaires . . . . .                                                                                     | 10    |
| CHAPITRE II. — <i>Le Méson.</i> . . . .                                                                                                              | 11    |
| 1 <sup>o</sup> Le Méson . . . . .                                                                                                                    | 11    |
| 2 <sup>o</sup> Données relatives au Méson. Masse, charge, vie moyenne. Spin, Création et disparition du Méson. . . . .                               | 12    |
| 3 <sup>o</sup> Perte d'énergie du Méson par ionisation. . . . .                                                                                      | 13    |
| 4 <sup>o</sup> Energie minimum nécessaire pour traverser un écran. Ecrans équivalents . . . . .                                                      | 15    |
| CHAPITRE III. — <i>Calcul de la disparition du Méson.</i> . . . .                                                                                    | 16    |
| 1 <sup>o</sup> Le parcours moyen . . . . .                                                                                                           | 16    |
| 2 <sup>o</sup> Création et disparition du Méson, hypothèses, discussion . . . . .                                                                    | 17    |
| 3 <sup>o</sup> Calcul de la probabilité de disparition . . . . .                                                                                     | 19    |
| 4 <sup>o</sup> Méthodes diverses . . . . .                                                                                                           | 22    |
| 5 <sup>o</sup> Méthode adoptée . . . . .                                                                                                             | 23    |
| 6 <sup>o</sup> Méthode graphique . . . . .                                                                                                           | 24    |
| CHAPITRE IV. — <i>Résultats expérimentaux.</i> . . . .                                                                                               | 26    |
| 1 <sup>o</sup> Mesures en altitude . . . . .                                                                                                         | 26    |
| 2 <sup>o</sup> Mesures au niveau de la mer . . . . .                                                                                                 | 30    |
| 3 <sup>o</sup> Correction barométrique . . . . .                                                                                                     | 31    |
| 4 <sup>o</sup> Critique des mesures. Stabilité, cause d'erreurs diverses. Niveau relatif des mesures aux deux stations, densité de l'écran . . . . . | 33    |
| 5 <sup>o</sup> Résumé des résultats expérimentaux. . . . .                                                                                           | 37    |
| CHAPITRE V. — <i>Premiers résultats.</i> . . . .                                                                                                     | 38    |
| 1 <sup>o</sup> Spectres d'absorption et d'énergie du rayonnement aux deux stations . . . . .                                                         | 38    |
| 2 <sup>o</sup> Vie moyenne du Méson déduite des spectres du rayonnement vertical . . . . .                                                           | 38    |
| 3 <sup>o</sup> Effet de diffusion dans les écrans. . . . .                                                                                           | 41    |
| 4 <sup>o</sup> Vie moyenne $\tau_0$ déduite des spectres corrigés de l'effet de diffusion . . . . .                                                  | 43    |
| CHAPITRE VI. — <i>Hauteur de formation du Méson</i> . . . . .                                                                                        | 44    |
| 1 <sup>o</sup> Les courbes de répartition angulaire du rayonnement . . . . .                                                                         | 44    |
| 2 <sup>o</sup> Rapports d'atténuation déduits des courbes de répartition angulaires . . . . .                                                        | 45    |
| 3 <sup>o</sup> Vie moyenne du méson. Méthode des conditions correspondantes . . . . .                                                                | 47    |
| 4 <sup>o</sup> Hauteur moyenne de formation des Mésons. . . . .                                                                                      | 49    |
| 5 <sup>o</sup> Critique des résultats obtenus . . . . .                                                                                              | 49    |
| CONCLUSION . . . . .                                                                                                                                 | 50    |
| BIBLIOGRAPHIE . . . . .                                                                                                                              | 51    |

# SUR LE COMPORTEMENT DANS L'ATMOSPÈRE, DES MÉSONS, PARTICULES COMPOSANT LA PARTIE PÉNÉTRANTE DES RAYONS COSMIQUES

Par

ANDRÉ FRÉON

INTRODUCTION. — L'existence, dans la partie corpusculaire du rayonnement cosmique, de deux groupes différents de particules a été mise en évidence en 1932, à la suite des expériences de Rossi (1) (2) (\*).

On sait que si l'on place deux ou plusieurs compteurs de Geiger-Müller dans un même plan et que, si l'on relie ceux-ci en coïncidence, c'est-à-dire au moyen d'un dispositif électrique tel que l'on ne détecte que les chocs produits simultanément dans les différents compteurs, on peut enregistrer le nombre des particules dont les trajectoires sont à l'intérieur de l'angle solide commun défini par les dimensions et l'écartement de ces compteurs. Ceux-ci ayant un rendement de l'ordre de 3 à 6 o/o seulement pour les photons (3), le nombre de coïncidences dû à ces derniers est négligeable.

Il existe un effet parasite dû aux gerbes, particules associées traversant simultanément les différents compteurs, on peut l'évaluer en décalant l'un de ceux-ci en dehors de l'angle solide commun aux autres.

Rossi a intercalé entre les compteurs des écrans de plomb d'épaisseur croissante, allant jusqu'à 1 m. Il a constaté que l'intensité du rayonnement diminue très vite pour les premiers centimètres, puis beaucoup plus lentement ensuite, atteignant finalement la moitié de la valeur initiale.

On a établi que le groupe « Mou » arrêté par les premiers centimètres d'écran présentait une absorption approximativement proportionnelle à  $Z^2$ , carré du nombre atomique de l'écran utilisé (4) et était constitué d'électrons positifs et négatifs en quantités égales (5 à 8).

(\*) Les références bibliographiques sont rassemblées à la fin de ce travail.

Le groupe pénétrant présente une absorption qui ne dépend en première approximation que de la quantité de matière traversée, quelle que soit sa nature.

L'effet de latitude, observé d'abord au moyen de chambres d'ionisation (9 à 15) puis de compteurs (16) montre un minimum d'intensité du rayonnement vers l'équateur magnétique, conformément aux calculs théoriques de Störmer (29) prouvant qu'au moins une partie de la radiation primaire incidente est composée de particules chargées. De plus l'effet d'asymétrie Est-Ouest (16 à 21) qui montre une prédominance du nombre des particules arrivant obliquement à l'Equateur en direction de l'Ouest par rapport à celles venant de l'Est, prouve que ces charges sont en grande majorité positives.

On a donc admis que la différence observée dans le pouvoir pénétrant des deux groupes de particules était due à la différence de leur nature et que celles composant le rayonnement pénétrant étaient des protons vraisemblablement primaires c'est-à-dire existant avant l'entrée du rayonnement dans l'atmosphère.

Cette théorie s'est heurtée assez vite à des difficultés : les statistiques obtenues au moyen de la chambre de Wilson placée dans un champ magnétique (21 à 25) montrent qu'au niveau de la mer il y a environ 8 particules pénétrantes négatives pour 10 positives, il faut alors admettre l'existence du proton négatif dont on n'a par ailleurs aucune preuve directe.

D'autres difficultés surviennent lorsqu'on étudie l'absorption du rayonnement pénétrant dans l'air : on constate, pour une égale quantité de matière traversée qu'elle est plus grande que celle des matières denses, le plomb par exemple (26 à 28) (47) (48).

La formule de Bloch (30) donnant la perte d'énergie du rayonnement par ionisation, ainsi qu'une théorie récente de Fermi (31), ne rendent pas compte de tout l'effet observé.

A l'instigation de M. Pierre Auger j'ai construit pour l'étude systématique du phénomène un appareil permettant la mesure de l'intensité du rayonnement dans toutes les directions et son absorption par des écrans allant jusqu'à 130 cm d'épaisseur.

Une première série de mesures a été faite en octobre 1938, au Laboratoire International de Jungfraujoch (Suisse), à l'altitude de 3.457 m, au cours d'une mission scientifique de la Caisse Nationale des Sciences.

Ayant eu, à cette époque, connaissance de l'hypothèse émise par Heisenberg suivant laquelle le rayonnement pénétrant serait composé, au moins en partie, de particules de masse intermédiaire entre celles du proton et de l'électron se décomposant spontanément ; j'ai entrepris en collaboration avec Paul Ehrenfest une nouvelle série d'expériences ainsi que le calcul théorique correspondant, en vue de mesurer la vie moyenne au repos de cette particule. Ces mesures, abrégées par la fin de notre mission, nous ont permis d'établir un accord qualitatif entre la théorie et l'expérience,

elles ne seront pas exposées ici, ayant fait l'objet de publications antérieures (35) (36).

Des mesures plus précises ont été effectuées au cours d'une nouvelle mission à Jungfraujoch en mai 1939, encadrées par deux séries de mesures de vérification au Laboratoire de Chimie Physique de la Faculté des Sciences de Paris.

La série complète de mesures correspondantes au niveau de la mer n'a pu être effectuée qu'en 1941 de mai à décembre au Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure.

Après un bref rappel de l'expérience initiale effectuée en collaboration avec Pierre Auger, Paul Ehrenfest et André Fournier, la description de l'appareil utilisé et les premiers résultats obtenus en altitude font l'objet du premier chapitre.

Le chapitre II est consacré à l'examen et au rassemblement des diverses données relatives au méson, sa perte d'énergie par ionisation est calculée dans le cas de l'air et du plomb à partir des formules théoriques; on établit une formule simple liant la perte d'énergie à l'épaisseur de l'écran en bon accord avec les résultats expérimentaux déjà connus.

Le troisième comprend la mise en équation du problème après révision et critique des hypothèses de départ. On en déduit une formule générale pouvant s'appliquer aux divers cas expérimentaux; une nouvelle méthode de mesures est proposée dont les avantages sont exposés, ainsi qu'un abaque permettant la détermination rapide des divers éléments du problème.

Les résultats expérimentaux font l'objet du chapitre IV où les causes d'erreurs sont examinées et corrigées.

On montre au chapitre V un important effet de diffusion décelé par des expériences complémentaires, le facteur de correction qui en résulte appliqué aux résultats expérimentaux obtenus en direction verticale conduit à des estimations de la vie moyenne de  $1,9$  et  $1,5 \pm 0,4 \mu s$ , obtenues indépendamment de toute hypothèse sur le lieu de production et le spectre d'énergie initial des Mésons. Dans le chapitre VI, ces mêmes facteurs de diffusion appliqués aux mesures angulaires permettent de définir les rapports d'atténuation expérimentaux du rayonnement dus à la désintégration, nécessaires pour employer la méthode indiquée.

On déduit des résultats précédents des mesures de  $\tau_0$  en fonction de la hauteur de formation supposée. Inversement en partant des valeurs de  $\tau_0$  obtenues par les méthodes directes on estime cette hauteur de formation. Les résultats obtenus en accord avec d'autres faits expérimentaux sont discutés. La hauteur de formation ainsi trouvée est notablement plus faible que celles admises jusqu'ici, elle correspond à une pression moyenne de  $3,5$  m d'eau.

## I. — MESURES PRÉLIMINAIRES

**1° Expérience initiale.** — C'est un ensemble de mesures effectuées, en collaboration avec Pierre Auger, Paul Ehrenfest et André Fournier, en altitude, au niveau de la mer et dans des laboratoires souterrains. Ainsi que nous le ferons par la suite chaque lieu d'observation est caractérisé par un nombre indiquant l'épaisseur en mètres de l'écran d'eau équivalent depuis le sommet de l'atmosphère en direction verticale soit 6,8 m à Jungfraujoch, 10 m approximativement au niveau de la mer, 30 pour la salle souterraine de l'Institut de Biologie (8,50 m de sol) et 75 pour la salle du Laboratoire de Chimie-Physique située dans les Catacombes (28 m de sol). 3 compteurs en coïncidences ont été situés dans un même plan, un écran de 6 cm de plomb a été disposé entre eux-ci. Le plan des compteurs a été incliné par rapport à la verticale sous des angles de 0, 20, 30, 45, 60, 75 et 90°.

Le nombre de coïncidences dû aux gerbes et aux fortuites est sensiblement constant et égal à la valeur

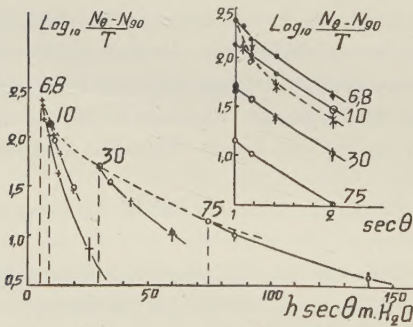


FIG. 1. — Expérience initiale.

trouvée pour 90°. On a donc porté figure 1 le logarithme décimal de la différence  $N_\theta - N_{90}$ , nombres moyens de rayons enregistrés par unité de temps sous les angles  $\theta$  et 90° en fonction de  $h \sec \theta$  épaisseur en mètres d'eau de l'écran traversé depuis l'entrée dans l'atmosphère,  $h$  étant égal dans chacun des cas au nombre défini ci-dessus.

Si la décroissance du rayonnement ne dépendait que de la quantité de matière traversée, quelle que soit son énergie, le coefficient d'absorption serait constant et tous les points expérimentaux seraient sur une même droite.

Si le coefficient d'absorption n'était pas constant mais que les différents écrans de même masse par  $\text{cm}^2$  soient équivalents les courbes obtenues aux différentes stations se confondraient avec la courbe pointillée joignant les points  $\theta = 0^\circ$ .

On voit sur la figure 1 qu'il n'en est pas ainsi, le sens de la concavité des courbes montre que le coefficient d'absorption décroît quand l'énergie moyenne de la radiation augmente, la position relative des courbes obtenues aux deux stations  $h = 6,8$  et  $h = 10$  m  $\text{H}_2\text{O}$  prouve de plus que, pour une même quantité d'air traversé la diminution du rayonnement est plus grande pour les directions obliques que suivant la verticale.

L'absorption dépendrait donc non seulement de la nature de l'écran mais aussi de sa densité.

Les courbes en haut et à droite de la figure 1 représentent  $\log_{10} (N\theta - N90^\circ)$  en fonction de  $\sec \theta$ . Elles montrent qu'en première approximation la forme de la courbe de répartition angulaire est indépendante de  $h$ , alors que l'hypothèse de la perte d'énergie du rayonnement par ionisation seule conduit à des courbes de plus en plus serrées autour de la verticale quand on s'enfonce dans l'atmosphère ; cette constatation sera utilisée au dernier chapitre.

**2° Appareil utilisé.** — Pour permettre l'étude systématique du phénomène on a monté un appareil comprenant :

a) Des compteurs de Geiger-Müller, de fabrication Philips suivant la technique de Max Cosyns (32) dont les caractéristiques sont les suivantes :

Coque cuivre, épaisseur 1 mm, diamètre intérieur 33 mm.

Longueur utile du compteur : 340 mm correspondant à une surface efficace de 112 cm<sup>2</sup> et à un comptage d'environ 200 chocs par minute au niveau de la mer. Le seuil de comptage est de l'ordre de 1 100 volts et le palier s'étend jusque vers 1 600 volts la tension normale d'utilisation étant de 1 400 à 1 500 volts. Le rendement de ces compteurs pour les particules pénétrantes est de l'ordre de 99 o/o.

b) Un sélecteur de coïncidences S (voir figure 2) à quatre directions monté suivant la technique de Maze (33) (34) son pouvoir de résolution étant voisin de  $10^{-6}$  sec, le nombre des coïncidences fortuites triples et quadruples est négligeable ainsi qu'on le verra chapitre IV.

c) Un support orientable en cornières et tubes d'acier soudés à l'auto-gène composé de 3 parties (v. fig. 2).

Un bâti A dans lequel on peut placer des écrans absorbants E, briques de plomb de  $20 \times 10 \times 5$  cm, l'épaisseur de l'écran pouvant atteindre un mètre.

Pour éviter les variations relatives de position entre les compteurs

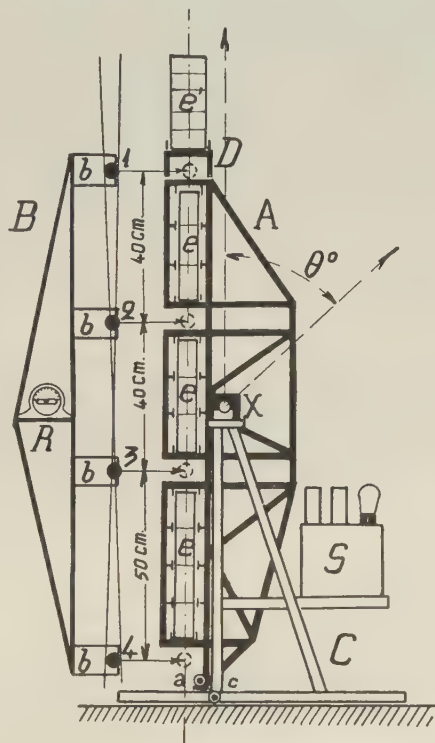


FIG. 2. — Schéma de l'appareil.

dues aux déformations possibles du bâti A sous la charge de l'écran (230 kg de plomb pour l'écran total), un deuxième bâti léger en tubes d'acier B comporte des plaquettes de bakélite paraffinées *b* sur lesquelles on peut fixer quatre compteurs. Des montages supplémentaires divers non figurés ont été utilisés pour décaler l'un des compteurs dans les diverses mesures de gerbes.

Ce bâti s'emboîte dans le premier, dont il peut être extrait à tout moment, quels que soient l'angle et l'écran utilisés, afin de permettre la vérification de l'alignement des compteurs ou du comptage parasite dû aux rayons secondaires des gerbes provenant de la masse métallique du bâti A.

Un troisième bâti, C, en cornières supporte le sélecteur S et l'ensemble des deux bâtis A et B qui peuvent pivoter autour de l'axe X, l'angle du plan des compteurs avec la verticale peut ainsi varier de 0 à 90°.

De plus deux entretoises non représentées figure 2 permettent de fixer l'orientation de l'appareil dans les directions choisies, elles sont munies de trous dans lesquels s'engagent les tenons *a* et *c* des bâtis A et C ; on peut ainsi, une fois le socle de l'appareil calé horizontalement, réaliser rapidement l'orientation du plan des compteurs à 20, 30, 45, 60, 75, et 90° par rapport à la verticale, le centre de gravité de l'ensemble des deux bâtis A et étant B voisin de X on peut changer l'angle d'orientation sans toucher à l'écran de plomb ce qui facilite le croisement des mesures.

— Des modifications de détail ont été apportées à ce montage lors de la dernière série de mesures :

Un support D monté sur le bâti A permet, en position verticale, de placer un écran E' de 25 cm au-dessus du premier compteur ce qui, avec l'introduction de 5 cm d'écran supplémentaires dans les vides du bâti porte à 130 cm l'épaisseur totale de l'écran.

De plus, pour permettre les mesures à des angles quelconques un rapporteur à niveau à bulle R a été monté sur le bâti B, et les tenons *a* viennent s'engager dans les trous de deux colliers couissant sur les entretoises.

La distance des compteurs extrêmes (envergure du système) est de 130 cm permettant une bonne définition angulaire du rayonnement, en direction verticale, les angles limites des rayons traversant les compteurs sont égaux à 1°30' par rapport à la verticale dans le plan de la figure et à 14°40' dans la direction perpendiculaire.

**3° Mesures préliminaires.** — Elles ont été effectuées en altitude avec 3 compteurs (positions 1, 3 et 4 de la fig. 2), dans un ancien refuge de montagne, à proximité du laboratoire.

L'effet à observer s'est trouvé complètement noyé par le grand nombre de coïncidences dû aux gerbes, la présence au-dessus de l'appareil d'un plafond et d'un toit en bois recouvert de 80 cm de neige, non gênants pour l'étude des rayons pénétrants, multipliant le nombre des rayons secondaires.

TABLEAU I. — *Mesures préliminaires.*

| 1  | 2<br>Angle<br>$\theta$ degrés | 3<br>Ecran<br>cm Pb | 4<br>Nombre<br>de<br>mesures | 5<br>$\Delta T$<br>Total<br>minutes | 6<br>$\Delta N$<br>Total<br>coincidences | 7<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$ | 8<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$<br>corrigé | 9<br>Observations |
|----|-------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1  | 0                             | 0                   | 6                            | 359                                 | 1.263                                    | 352 $\pm$ 10                                                                                  | 312 $\pm$ 11                                                                                             |                   |
| 2  | 90                            | 0                   | 1                            | 133                                 | 40                                       | 30 $\pm$ 4,5                                                                                  |                                                                                                          |                   |
| 3  | 0                             | 10                  | 6                            | 636                                 | 1.265                                    | 199 $\pm$ 5,6                                                                                 | 159 $\pm$ 7                                                                                              | Mesure (1)        |
| 4  | 30                            | 10                  | 4                            | 531                                 | 741                                      | 139,5 $\pm$ 5                                                                                 | 99,5 $\pm$ 3,5                                                                                           |                   |
| 5  | 45                            | 10                  | 8                            | 1.351                               | 1.476                                    | 109 $\pm$ 2,9                                                                                 | 69 $\pm$ 4                                                                                               |                   |
| 6  | 60                            | 10                  | 5                            | 745                                 | 557                                      | 75 $\pm$ 3,2                                                                                  | 35 $\pm$ 3                                                                                               |                   |
| 7  | 75                            | 10                  | 4                            | 1.339                               | 684                                      | 51,2 $\pm$ 1,7                                                                                | 11,2 $\pm$ 3                                                                                             |                   |
| 8  | 90                            | 10                  | 4                            | 1.338                               | 518                                      | 38,7 $\pm$ 1,7                                                                                |                                                                                                          |                   |
| 9  | 0                             | 60                  | 5                            | 583                                 | 644                                      | 110,5 $\pm$ 4,4                                                                               | 80,5 $\pm$ 7                                                                                             | Mesure (2)        |
| 10 | 30                            | 60                  | 5                            | 911                                 | 919                                      | 101 $\pm$ 3,4                                                                                 | 64 $\pm$ 5,5                                                                                             |                   |
| 11 | 45                            | 60                  | 7                            | 825                                 | 695                                      | 84,3 $\pm$ 3,2                                                                                | 42,5 $\pm$ 5                                                                                             |                   |
| 12 | 60                            | 60                  | 7                            | 989                                 | 698                                      | 70,6 $\pm$ 2,8                                                                                | 25,6 $\pm$ 4                                                                                             |                   |
| 13 | 75                            | 60                  | 4                            | 2.346                               | 1.292                                    | 55,1 $\pm$ 1,6                                                                                | 10,1 $\pm$ 2,2                                                                                           |                   |
| 14 | 90                            | 60                  | 2                            | 1.428                               | 636                                      | 44,6 $\pm$ 1,8                                                                                |                                                                                                          |                   |
| 15 | 0                             | 10                  | 3                            | 919                                 | 557                                      | 60,6 $\pm$ 2,5                                                                                |                                                                                                          | Gerbes (1)        |
| 16 | 45                            | 10                  | 3                            | 467                                 | 270                                      | 57,8 $\pm$ 3,5                                                                                |                                                                                                          | »                 |
| 17 | 75                            | 10                  | 1                            | 609                                 | 270                                      | 44,3 $\pm$ 2,8                                                                                |                                                                                                          | »                 |
| 18 | 0                             | 60                  | 5                            | 688                                 | 207                                      | 30,1 $\pm$ 2,1                                                                                |                                                                                                          | Gerbes (2)        |
| 19 | 45                            | 60                  | 3                            | 449                                 | 190                                      | 42,3 $\pm$ 3,1                                                                                |                                                                                                          | »                 |
| 20 | 75                            | 60                  | 2                            | 873                                 | 376                                      | 43,1 $\pm$ 2,2                                                                                |                                                                                                          | »                 |
| 21 | 0                             | 10                  | 1                            | 235                                 | 95                                       | 40,4 $\pm$ 4                                                                                  |                                                                                                          | Gerbes (3)        |
| 22 | 0                             | 10                  | 1                            | 278                                 | 117                                      | 42 $\pm$ 3,9                                                                                  |                                                                                                          | Gerbes (4)        |
| 23 | 0                             | 5                   | 1                            | 190                                 | 423                                      | 222 $\pm$ 11                                                                                  | 182 $\pm$ 12                                                                                             |                   |
| 24 | 0                             | 20                  | 1                            | 80                                  | 132                                      | 165 $\pm$ 14,5                                                                                | 125 $\pm$ 16                                                                                             |                   |

D'autres expériences, étrangères à ce travail devant être conduites simultanément on ne pouvait disposer d'un autre local, ni d'un quatrième compteur qui aurait diminué l'effet parasite, on a donc diminué l'envergure du système qui a été réduite à 80 cm. L'effet utile croît en effet comme l'angle solide, soit à peu près comme  $(130/80)^2 = 2,6$  tandis que celui des gerbes augmente de moins de  $130/80 = 1,6$ .

Les compteurs ont donc été placés en 1, 2, 3 permettant l'emploi d'écrans de 60 cm d'épaisseur.

Deux séries de mesures ont été faites avec des écrans respectifs de 10 et 60 cm de plomb, de plus des mesures complémentaires ont permis d'étudier systématiquement l'effet des gerbes.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau I.

On a porté dans la colonne 7 du tableau le nombre moyen des coïncidences observées par 100 minutes, suivi de l'erreur statistique probable calculée à la manière habituelle, quotient de la racine carrée du nombre des coïncidences par le temps. Ces mêmes valeurs, corrigées de l'effet des gerbes, figurent colonne 8.

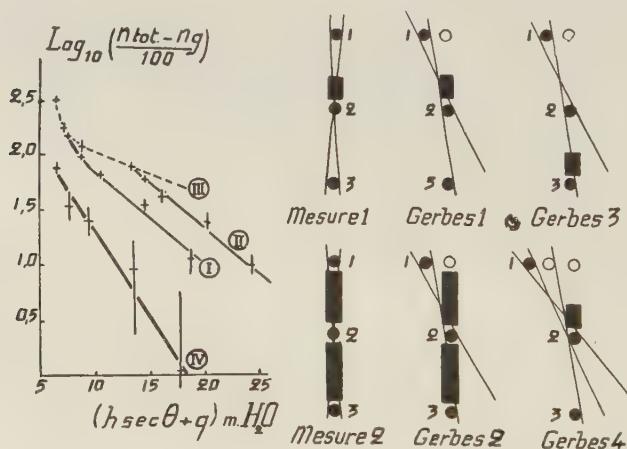


FIG. 3. — Résultats de l'expérience préliminaire.

Il est important d'examiner de près cet effet, ici particulièrement net, et qui montre la nécessité de la mesure systématique des gerbes dans chaque condition d'expérience.

Le compteur supérieur a été décalé juste en dehors de l'angle solide commun aux deux autres (voir figure 3 les schémas Gerbes (1 et 2)). L'examen des mesures nos 15, 16, 17 et 8 du tableau I prouve que le nombre des gerbes observées décroît fortement quand l'angle  $\theta$  augmente. Ce fait doit être attribué à des rayons secondaires formés par les rayons traversant le premier compteur dans l'angle inférieur gauche de la brique

de plomb (\*), ainsi qu'il est facile de s'en assurer d'après les mesures 22, compteur 1 décalé de 20 cm, et 21, plomb au-dessus du compteur 3 (correspondant aux schémas Gerbes (4 et 3) de la figure 3).

On en déduit que, dans les mesures (3 à 8) les rayons secondaires formés dans l'écran ayant toute l'épaisseur de celui-ci à traverser sont arrêtés et par conséquent l'effet parasite dû aux gerbes doit être dans ce cas sensiblement constant, il a donc été déduit des mesures n<sup>os</sup> 3 à 7, 23 et 24, un nombre de gerbes égal à  $40 \pm 2$  par 100 minutes.

L'examen des mesures n<sup>os</sup> 18, 19, 20 et 14 justifie cette manière de procéder, l'augmentation des gerbes avec l'angle  $\theta$ , prouve qu'elles sont bien dues à des rayons secondaires des gerbes « arrosant » les écrans et provenant des régions situées à la surface de ceux-ci. Cette hypothèse est également confirmée par l'examen des 3 mesures faites à 90° n<sup>os</sup> 2, 8 et 14 montrant une augmentation du nombre des coïncidences avec l'épaisseur de l'écran par suite de la présence de quantités croissantes de plomb au voisinage des compteurs. On a donc pour les mesures 9 à 13 déduit dans chaque cas le nombre de gerbes correspondant. La correction pour les mesures 10,  $\theta = 30^\circ$ , et 12,  $\theta = 60^\circ$  a été interpolée d'après les résultats trouvés pour  $\theta = 0,45$  et  $75^\circ$ .

On trouvera figure 3 le logarithme décimal des nombres ainsi corrigés en fonction de l'épaisseur totale de l'écran  $h \sec \theta + q$  exprimée en mètres d'eau,  $h$  a la signification déjà indiquée,  $q$  exprime l'équivalent en eau de l'écran de plomb employé. On a admis ici que 10 cm de plomb étaient équivalents à 1 m d'eau, cette hypothèse n'est pas tout à fait correcte ainsi que nous le verrons chapitre II, mais les résultats qui suivent restent quand même valables :

La courbe III, figure 3 représente la décroissance de l'intensité du rayonnement en direction verticale par absorption locale dans le plomb, les courbes I et II celle du rayonnement filtré par 10 et 60 cm de plomb en fonction de l'angle  $\theta$ .

La position relative des courbes I et III confirme les premiers résultats obtenus (voir fig. 1). Le fait que la courbe II soit située également au-dessous de la courbe III est la preuve que le phénomène existe bien encore pour les rayons de grande énergie capables de traverser 60 cm de plomb. Ce qui représente une énergie minimum de l'ordre de  $10^9$  eV, correspondant à  $\beta = 0,996$  d'après les mesures faites par Paul Ehrenfest à la chambre de Wilson dans le champ magnétique du grand électro-aimant de Bellevue (25).

La courbe IV, logarithme décimal de la différence des nombres de coïncidences pour 10 et 60 cm de plomb représente donc la répartition angulaire des rayons pénétrants d'énergies comprises entre 0,16.  $10^9$  et  $10^9$  ev.

(\*) Ceci peut être dû également à des rayons solitaires déviés dans le plomb par diffusion mais l'importance relative du groupe mou à cette altitude, et les mesures 18, 19, 20, 14 conduisent à penser que ce phénomène est accessoire.

**4<sup>e</sup> Deuxième série de mesures préliminaires.** — On n'exposera ici que le dispositif expérimental employé, utilisé sans modifications lors de la reprise de la série complète des mesures exposée au chapitre IV. En vue d'utiliser l'envergure totale de l'appareil il fallait diminuer le nombre des gerbes, on a procédé de la façon suivante :

Une légère armature de bois a été construite sur la terrasse supérieure du laboratoire contre la cabane d'aluminium utilisée pour d'autres expériences. Cette armature, recouverte d'une forte toile où l'on ne laissait pas la neige s'accumuler présentait une absorption négligeable, même pour la partie molle du rayonnement. On évite ainsi la multiplication des rayons des gerbes. De plus (voir fig. 4) le compteur inférieur a été entouré d'un rouleau de feuilles de plomb d'une épaisseur totale de 8,5 cm, d'autres feuilles et des briques de plomb ont porté à 14 cm l'épaisseur totale de la protection.

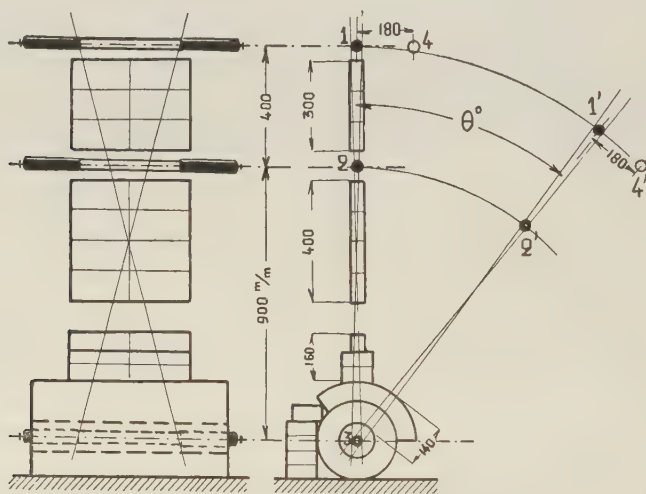


FIG. 4. — Disposition adoptée dans les mesures en altitude.

Le nombre de coïncidences triples entre les compteurs 1'2'3 est de l'ordre de 9, alors qu'il n'est plus que de 2,5 par 100 minutes pour 4'2'3 (gerbes). La mesure devient donc possible tandis que dans les expériences préliminaires on comptait 29 coïncidences dues aux gerbes, soit plus de quatre fois le nombre de rayons obliques à mesurer.

Après quelques difficultés, provenant d'un défaut d'isolement des compteurs par suite de l'humidité, auxquelles il a été facile de remédier en paraffinant les extrémités des compteurs et en séchant l'atmosphère par chauffage électrique au voisinage de l'appareil, le montage a fonctionné correctement.

## II. — LE MÉSON

1° **Le Méson.** — L'hypothèse de l'existence d'une nouvelle particule a été introduite pour la première fois en 1935 par Yukawa, indépendamment des problèmes du rayonnement cosmique, dans un travail théorique sur les forces nucléaires (37).

Bhabha (38), Yukawa et ses collaborateurs (39) ont montré qu'une telle particule, si elle existe, doit se désintégrer spontanément.

En admettant une masse au repos  $\mu_0$  100 fois plus grande que celle de l'électron Yukawa trouve une vie moyenne au repos  $\tau_0$  égale à  $5 \times 10^{-7}$  seconde. Par suite de la transformation de Lorentz, pour un observateur au repos celle-ci augmente avec l'énergie cinétique de la particule, elle devient de l'ordre de  $10^{-5}$  sec pour  $10^9$  eV, et de  $10^{-4}$  sec pour  $10^{10}$  eV, à ces chiffres correspondent des parcours moyens respectifs de 3 et de 30 km.

Il s'ensuit, comme l'a remarqué Yukawa, que si une telle particule existe dans le rayonnement cosmique elle est nécessairement secondaire, formée dans l'atmosphère aux dépens d'un autre rayonnement.

Les clichés obtenus au moyen de la chambre de Wilson placée dans un champ magnétique présentent parfois des trajectoires dont l'ionisation est plus forte que celle qui serait produite par un électron de même énergie, et dont le parcours est bien supérieur à celui qu'aurait un proton de même énergie, celle-ci étant connue d'après la courbure de la trajectoire par le champ magnétique.

Kundze (40) Neddermeyer et Anderson (41) Paul Ehrenfest (42) et divers autres auteurs (43 à 46) ont obtenu de tels clichés. Certains ont permis d'évaluer la masse probable de cette particule.

On a proposé des noms variés pour la désigner :

Quantum lourd, Electron lourd, Yukkon, Barytron, Mésotron, Mésoton, nous l'appellerons ici *Méson*, ainsi que le font actuellement la plupart des théoriciens.

Heisenberg a donné une explication de l'absorption anormale des matériaux légers en admettant que ces particules constituaient la radiation pénétrante. En effet, à masse traversée égale les matières de faible densité présentent une longueur géométrique de parcours plus grande que les matières denses.

Une certaine fraction du rayonnement se désintègre, le temps que met la particule à traverser l'écran n'étant plus négligeable par rapport à sa vie moyenne.

Euler (49), Euler et Heisenberg (50) ont établi un premier calcul permettant de prévoir la forme du spectre d'énergie du rayonnement dans l'atmosphère aux différentes altitudes.

Un calcul analogue sera exposé chapitre III après révision des diverses hypothèses de départ.

2° **Données relatives au Méson.** — a) **MASSE.** — Elle a fait l'objet d'un certain nombre de mesures obtenues, au moyen de la chambre de Wilson dans le champ magnétique par différentes méthodes. Les valeurs obtenues s'échelonnent entre 90 et 300 fois la masse de l'électron.

TABLEAU II. — *Résumé des résultats expérimentaux relatifs à la masse du méson.*

| Auteurs                             | Réf. | Méthodes                      | Masse $\mu_0$ |
|-------------------------------------|------|-------------------------------|---------------|
| Kundze . . . . .                    | 40   | Courbure et parcours          | $\leq 300$    |
| Neddermeyer et Anderson . . . . .   | 41   | »                             | 240           |
| Nishina et Collaborateurs . . . . . | 53   | »                             | 161 à 179     |
| Maier Leibnitz . . . . .            | 55   | »                             | $\sim 100$    |
| Nishina et Collaborateurs . . . . . | 54   | Perte d'énergie dans un écran | 160 à 200     |
| Wilson . . . . .                    | 56   | »                             | 150 à 190     |
| Neddermeyer et Anderson . . . . .   | 41   | »                             | 240           |
| Ehrenfest . . . . .                 | 42   | Courbure et ionisation        | 200           |
| Corson et Brode . . . . .           | 45   | »                             | 250           |
| Street et Stevenson . . . . .       | 43   | »                             | 95 à 165      |
| Hugues . . . . .                    | 57   | »                             | 160 à 196     |
| Hugues . . . . .                    | 57   | »                             | $\sim 180$    |
| Kundze . . . . .                    | 40   | »                             | 150 à 200     |
| Williams. . . . .                   | 71   | »                             | 130 à 190     |
| Williams. . . . .                   | 71   | »                             | 150 à 270     |
| Ruhlig et Crane . . . . .           | 46   | Courbure dans le gaz          | 90 à 150      |
| Leprince-Ringuet et Coll. . . . .   | 51   | Choc contre un électron       | 220 à 260     |
| Hugues . . . . .                    | 57   | »                             | 165 à 213     |

Divers auteurs ont émis l'hypothèse de masses multiples voire même d'une distribution continue de celles-ci (59) (60) (61) les mesures directes de la masse du méson ne semblent pas suffisamment précises actuellement pour que l'on puisse l'affirmer avec certitude.

Nous adopterons ici une valeur unique voisine de 200 fois celle de l'électron, moyenne des meilleures mesures, elle correspond à une énergie au repos  $\mu_0 c^2$  de  $10^8$  eV.

b) **CHARGE.** — Elle est égale à celle de l'électron. Là encore on n'a pas de certitude, c'est une forte probabilité, fondée principalement sur l'étude de l'ionisation le long des trajectoires observées à la chambre de Wilson, comparée à celles que l'on sait dues à des électrons ou à des protons. L'ionisation variant avec le carré de la charge une particule de charge 2 donnerait une ionisation quatre fois plus forte.

Les charges sont des deux signes, on constate dans les diverses statistiques un excès d'environ 30 o/o de Mésons positifs (22) (23) (72) (106).

c) **VIE MOYENNE.** — Il y a de nombreuses mesures indirectes fondées sur l'absorption anormale de l'atmosphère (62) (63) (73) (67) (65) (93) (94) 88) (69) et sur d'autres effets liés à celui-ci : effet barométrique (74) (68), effet de température (67) (84), ou sur les proportions relatives des deux

composantes de la radiation cosmique (62) (67) (103) (105). Les valeurs ainsi obtenues sont comprises entre 1 et 4  $\mu$  sec. Les meilleures, parce qu'elles ne nécessitent pas d'hypothèses sur l'altitude de formation du rayonnement dans l'atmosphère, ni sur son spectre d'énergie à cette altitude sont celles de Rossi Hilberry et Hoag (70) d'une part, de Nielsen, Ryerson, Nordheim et Morgan (78) d'autre part, qui trouvent respectivement 2 et  $1,2 \pm 0,3$   $\mu$  sec.

Remarquons que, dans toutes ces mesures, c'est  $\tau_0/\mu_0$  qui résulte de l'expérience, en plus des erreurs expérimentales  $\tau_0$  est donc entaché d'une incertitude égale à celle de la masse. Les valeurs de  $\mu_0$  admises par les différents expérimentateurs variant de 160 à 240 il faut pour comparer les diverses valeurs expérimentales les rapporter à une même masse.

Le Méson donnant naissance, lors de sa désintégration, à un électron et un neutrino il existe depuis peu des mesures directes du retard dans le temps de l'électron par rapport au Méson incident. Ce sont celles d'Auger, Maze et Chaminade (95) (96) donnant  $\tau_0 = 1,4 \pm 0,3 \cdot 10^{-6}$  sec et celles de Rasetti (79) (80) (81) donnant  $1,5 \pm 0,3 \cdot 10^{-6}$  sec.

Ces valeurs sont toutes notablement plus grandes que celle indiquée par Yukawa (39) mais l'on ne peut affirmer à l'heure actuelle l'identité des Mésons observés dans le rayonnement cosmique avec les particules de la théorie de Yukawa, une théorie récente de Rozenthal (66) explique cette différence par la coexistence de deux types de particules, l'une de vie moyenne  $\tau_0 = 10^{-8}$  sec échappant aux mesures par suite de son faible parcours et l'autre dont la vie moyenne correspondrait à la valeur expérimentale.

d) SPIN. — Nous n'aurons pas à le considérer au cours de ce travail, signalons seulement qu'on a d'abord admis la valeur 1 mais que d'après des travaux récents (82) (83) (115) la possibilité de spins différents n'est pas exclue.

e) CRÉATION ET DISPARITION DU MÉSON. — Divers processus de création sont envisagés (110) (104) (107) (108) (109), une seule chose est certaine c'est le fait qu'il prend naissance dans l'atmosphère à cause de la faible valeur de son parcours moyen comparé à la hauteur de celle-ci.

Sa désintégration avec production d'un électron semble également bien établie par des expériences directes (79) (80) (81) (95) (96) (\*) tout au moins pour une fraction importante du rayonnement (81).

3° **Perte d'énergie du Méson par ionisation.** — L'hypothèse, admise dans l'introduction, que la perte d'énergie de la radiation pénétrante par ionisation ne dépend que de la quantité de matière traversée

(\*) Des mesures publiées effectu (120) récemment par l'auteur permettent de déceler des gerbes molles locales comprenant des particules asynchrones et dues vraisemblablement à la désintégration du Méson.

n'est qu'une première approximation. Plusieurs formules mi-théoriques, mi-expérimentales ont été établies permettant de calculer cette perte (85) (86) (110) (111).

La meilleure est celle de F. Bloch (30), que nous emploierons ici avec l'approximation de Born, valable pour les particules rapides du rayonnement cosmique :

$$-dE/\rho dx = \frac{2\pi NZe^2q^2}{m_0c^2\rho\beta^2} [\text{Log}_e \frac{m_0c^2\beta^2W}{(1-\beta^2)^2} + (1-\beta^2)] \quad [1]$$

où :

$$W \text{ (62)} = (E + 2\mu_0c^2)/(1 + m_0c^2(1 + \mu_0/m_0)^2/2E) \quad [2]$$

elle donne la perte d'énergie du rayonnement par gramme/cm<sup>2</sup> de matière traversée,  $Z$  est le nombre atomique de l'élément constituant l'écran,  $\rho$  sa densité,  $N$  le nombre d'atomes par centimètre cube,  $e$  est la charge de l'électron,  $m_0$  sa masse,  $m_0c^2$  son énergie au repos.

$\bar{I}$  est le potentiel moyen d'ionisation des électrons de l'atome, il vaut 13,5  $Z$  électrons-volts d'après les calculs de Bloch, calculs de mécanique statistique quantique appliqués à l'ensemble de l'atmosphère électronique entourant le noyau.

$q$  est la charge de la particule incidente,  $\beta c$  sa vitesse,  $E$  son énergie et  $W$  l'énergie maximum qu'elle est susceptible de communiquer à un électron par choc direct.

La valeur de  $\bar{I}$  est en bon accord avec les pertes d'énergies expérimentales des rayons  $\alpha$  dans un écran d'or (87). La validité de la formule complète a été étendue aux particules de grande énergie du rayonnement cosmique, par les mesures de perte d'énergie de ces derniers dans un écran de 2 cm d'or, effectuées par J. G. Wilson (63) et dans un écran de 9 cm d'or par Paul Ehrenfest (64).

Il est commode de prendre l'énergie au repos du Méson comme unité, on posera donc :

$$\delta = E_{\text{totale}}/\mu_0c^2 \quad [3]$$

soit ici 10<sup>8</sup> eV d'après la valeur admise pour  $\mu_0$ . A partir de  $\delta \geq 2$ , ce qui aura toujours lieu dans nos calculs, le terme en  $(1 - \beta^2)$  inférieur au centième du terme logarithmique est négligeable, de plus comme  $\mu_0/m_0 = 200$  on peut remplacer le terme  $(1 + \mu_0/m_0)^2$  par  $(\mu_0/m_0)^2$ .

Avec ces simplifications et en remplaçant le logarithme népérien par un logarithme vulgaire la formule [1] devient, après calcul des constantes :

$$-dE/\rho dx = 5,826 \times \underbrace{\frac{NZ}{\rho}}_{\text{écran}} \times \underbrace{\frac{\delta^2}{\delta^2 - 1}}_{\text{particule}} \times \left[ \underbrace{11,447 - 2 \log_{10} Z}_{\text{écran}} + \underbrace{\log_{10} \frac{(\delta^2 - 1)^2}{\delta + 100}}_{\text{particule}} \right] \quad [4]$$

formule où la perte d'énergie est exprimée en 10<sup>8</sup> eV par g/cm<sup>2</sup>.

|                         |           |                            |                     |
|-------------------------|-----------|----------------------------|---------------------|
| pour l'air $Z$          | $= 7,21,$ | $NZ/\rho = 3,028.10^{23},$ | $2 \log Z = 1,716$  |
| pour le plomb $Z = 82,$ |           | $NZ/\rho = 2,398.10^{23},$ | $2 \log Z = 3,8276$ |
| pour l'eau $Z$          | $= 3,33,$ | $NZ/\rho = 3,364.10^{23},$ | $2 \log Z = 1,0458$ |

Les pertes d'énergie calculées dans le cas de l'air et du plomb sont données figure 5 ainsi que leur rapport (courbe pointillée).

Les pertes pour l'eau, non figurées ici, diffèrent de moins de 10 o/o de celles pour l'air, il sera commode de continuer à évaluer les quantités d'air traversées en mètres d'eau équivalents, en sous-entendant que 1 m d'eau équivalent signifie 100 g/cm<sup>2</sup> d'air.

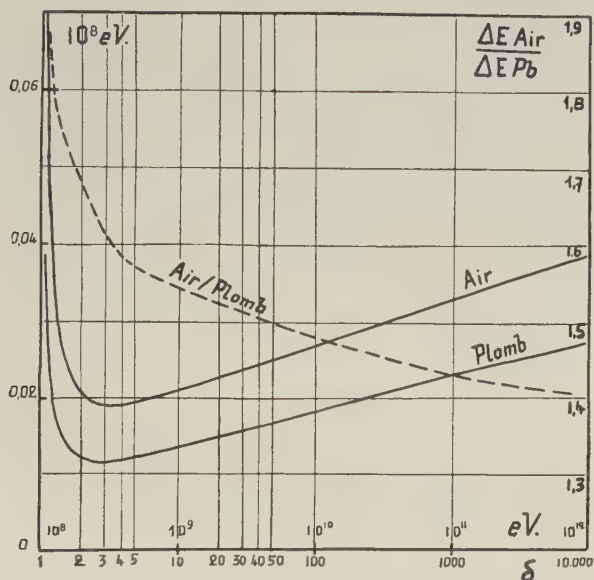


FIG. 5. — Pertes d'énergie  $\Delta E$  du Méson en  $10^8$  eV par g/cm<sup>2</sup> de matière traversée dans le cas de l'air et du plomb calculées en fonctions de l'énergie de la particule.

**4° Energie minimum nécessaire pour traverser un écran. Ecrans équivalents.** — Les courbes précédentes permettent, par une intégration graphique simple, de calculer l'énergie minimum nécessaire pour traverser un écran d'épaisseur ou de masse par centimètre carré donnée, un calcul analogue a été effectué par Gorodetzky (52) dans le cas du plomb.

L'énergie minimum est une fonction très sensiblement linéaire de  $x$ , épaisseur ou masse par centimètre carré de l'écran :

$$E = \mu_0 c^2 + \alpha x. \quad [5]$$

Le calcul donne les résultats suivants :

$$\text{Pour l'air} : E_{\text{minimum}} = (1 + 0,019x \text{ (g/cm}^2\text{)}) 10^8 \text{ eV} \quad [6]$$

$$\text{Pour le plomb} : E_{\text{minimum}} = (1 + 0,133x \text{ (cm)}) 10^8 \text{ eV} \quad [7]$$

Le coefficient  $\alpha$  augmente assez lentement avec l'énergie pour justifier dans le cas de l'air, la perte d'énergie constante de  $0,02 \cdot 10^8$  eV par g/cm<sup>2</sup> admise par divers auteurs (62) (67) (93).

On admettra donc ici une perte par ionisation dans l'air  $\varepsilon = 2.10^8$  eV par mètre d'eau équivalent, les valeurs moyennes de l'énergie du rayonnement étant comprises entre 5 et 15  $\delta$  dans nos expériences on voit d'après la figure 5, courbe de l'air, que cette hypothèse est justifiée.

Pour le plomb la perte d'énergie de  $0,133.10^8$  eV par centimètre est en accord avec les valeurs expérimentales de Wilson (56) qui trouve :

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,121 \pm 0,02.10^8 \text{ eV p. cm Pb pour } 2.10^8 < E < 4.10^8 \text{ eV} \\ \alpha &= 0,143 \pm 0,036.10^8 \text{ eV p. cm Pb pour } 4.10^8 < E < 7.10^8 \text{ eV}\end{aligned}$$

Paul Ehrenfest trouve également :

$$\alpha = 0,16.10^8 \text{ eV p. cm Pb pour } E \leq 2.10^9 \text{ eV.}$$

La comparaison des formules [6] et [7] nous permet immédiatement de voir que l'absorption de 100 g/cm<sup>2</sup> d'air soit 1 m d'eau équivalent est la même que celle de 14,3 cm de plomb nous dirons que 1 m d'eau équivaut à 14,3 cm de plomb, valeur en excellent accord avec les expériences directes de Clay et Van Gemert (65) donnant  $14,5 \pm 0,3$  cm et celles de Pomerantz (62) donnant  $15,1 \pm 2$  cm. La perte d'énergie du Méson par ionisation semble donc actuellement bien connue, ainsi que les épaisseurs équivalentes des différents écrans.

### III. — CALCUL DE LA DISPARITION DU MÉSON

**1° Le parcours moyen.** — On a vu chapitre II, § 1<sup>er</sup>, que, par suite de la transformation de Lorentz, la vie moyenne apparente  $\tau$ , pour un observateur au repos, croissait avec l'énergie du Méson. Elle est liée à la vie moyenne au repos par la relation :  $\tau = \tau_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ . Le parcours moyen  $L$  a donc pour valeur  $L = \beta c \tau = \beta c \tau_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ .

On sait d'autre part que si  $\mu_0$  est la masse au repos :

$$\mu = \mu_0 (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$$

donc :

$$L = \mu \beta c \tau_0 / \mu_0 = p \tau_0 / \mu_0,$$

$p$  étant le moment cinétique de la particule, on peut donc encore écrire :

$$L = (pc / \mu_0 c^2) \tau_0 c \quad [8]$$

$pc$  a les dimensions d'une énergie, quand  $\beta$  augmente il se confond avec l'énergie cinétique puis avec l'énergie totale.

La quantité sans dimensions  $pc / \mu_0 c^2$  appelée moment réduit par certains auteurs (89) (52) se confond alors avec la quantité  $\delta$  définie formule [3] ; ce sera le cas par la suite, à cause de l'écran disposé dans nos expériences pour éliminer la partie molle du rayonnement. On voit que  $L$  est alors

proportionnel à l'énergie de la particule, ainsi que nous l'avions indiqué chapitre II, § 1<sup>er</sup>.

De plus les expériences donnant  $L$ , l'énergie étant connue d'après les formules [6] et [7] nous permettent de connaître  $\tau_0/\mu_0$ .

**2° Création et disparition des Mésons.** — Sans parler des processus probables (voir chap. II, § 2e) nous examinerons ici les hypothèses nécessaires au calcul :

A. — Les Mésons sont produits à partir d'une RADIATION PRIMAIRE P qui est ISOTROPE en dehors de l'atmosphère (nous ne préciserons pas si ce processus est direct, indirect ou les deux à la fois).

— LES TRAJECTOIRES DES RAYONS PRIMAIRES SONT SENSIBLEMENT RECTILIGNES.

— Les rayons primaires perdent leur énergie :

a) PAR IONISATION, la perte d'énergie est fonction de la quantité de matière traversée et de l'énergie.

b) PAR FORMATION DE MÉSONS, processus qui dépend également de la quantité de matière traversée et de l'énergie.

B. — LES MÉSONS FORMÉS ONT DES TRAJECTOIRES SENSIBLEMENT RECTILIGNES ET DANS LA DIRECTION DE CELLE DU RAYON PRIMAIRE.

— ILS PERDENT LEUR ÉNERGIE PAR IONISATION, perte dépendant de la quantité de matière traversée et de l'énergie.

— ILS DISPARAISSENT PAR DÉSINTÉGRATION SPONTANÉE le long de leur parcours avec une probabilité par unité de longueur inversement proportionnelle à leur énergie (ceci résulte du paragraphe précédent).

Faisons un examen critique de ces diverses hypothèses :

RADIATION PRIMAIRE ISOTROPE. — Ceci est exact à toute latitude si la radiation primaire n'est pas chargée. Si ce sont des particules chargées, en particulier des protons, c'est encore exact pour les latitudes supérieures à 40° où l'effet de latitude cesse d'être appréciable. Il peut subsister un léger effet Est-Ouest ainsi que la possibilité d'une structure fine du rayonnement mais ces divers facteurs sont de l'ordre de quelques centièmes au maximum. On possède des résultats expérimentaux indiquant que la répartition angulaire de la radiation devient isotrope en haute altitude. Cette hypothèse peut donc être considérée comme valable à moins de 10 o/o près.

TRAJECTOIRES RECTILIGNES. — Elles sont en réalité courbées par le champ magnétique terrestre, qui est de l'ordre de 1/3 de gauss au niveau de la mer, dans le cas de particules chargées.

En appliquant la formule  $pc(\text{eV}) = 300 H\rho$  utilisée dans les mesures

d'énergies, déduites de la courbure  $\rho$  cm des trajectoires observées dans la chambre de Wilson soumise à un champ de H gauss, on trouve pour un proton de  $2.10^9$  eV, énergie minimum nécessaire pour traverser l'atmosphère :

$$\rho = 2 \times 10^9 / 300 \times 0,3 = 2/9.10^8 \text{ cm} = 220 \text{ km.}$$

Valeur qui est grande vis-à-vis des trajets que nous avons à considérer ici (de l'ordre de 50 à 60 km au maximum).

Il en est de même pour les Mésons, d'énergie plus faible mais pour lesquels les trajets sont également plus réduits.

Il existe d'autre part un effet de diffusion. Wilson (90) a donné, dans le cas des Mésons, une formule générale, en bon accord avec les résultats expérimentaux de Code (91) et Williams (92), cette formule calculée dans le cas de l'air, donne :

$$\overline{\Delta\theta} = 4,9 \sqrt{n} 10^{-12} / \delta$$

où  $\overline{\Delta\theta}$  est la dispersion angulaire moyenne en degrés,  $n$  le nombre total des molécules comprises dans une colonne d'un centimètre carré de section ayant la longueur de la trajectoire,  $\delta$  l'énergie moyenne de la particule en unités  $\mu_0 c^2$ . La dispersion varie comme l'inverse de la racine carrée de la masse de la particule, elle est donc trois fois plus faible pour les protons.

Le calcul a été effectué dans le cas concret suivant : Un proton d'énergie  $\delta = 40$  faisant avec la verticale un angle de  $30^\circ$  forme à l'altitude de 20 km un méson qui arrive au niveau de la mer et dont l'énergie moyenne est de l'ordre de 15 unités  $\mu_0 c^2$ . On trouve les résultats suivants :

$$\overline{\Delta\theta} (\text{proton}) = 0,1 \text{ degré} \quad \overline{\Delta\theta} (\text{méson}) = 1,8 \text{ degrés.}$$

#### TRAJECTOIRES DES MÉSONS DANS LA DIRECTION DE LA TRAJECTOIRE PRIMAIRE.

— En cas de dispersion la direction initiale est privilégiée, en tout cas les Mésons les plus énergiques, qui sont capables d'arriver sans désintégration aux basses altitudes où sont placés nos appareils doivent être sensiblement dans cette direction. Cette hypothèse pourrait se trouver partiellement en défaut en cas de processus indirects (radiation intermédiaire ou phénomènes explosifs).

PERTES D'ÉNERGIE PAR IONISATION. — Cette question a été étudiée dans le chapitre II, § 3 et 4 pour les Mésons, dans le cas des Protons on arrive à des résultats analogues.

— On peut considérer les hypothèses qui précèdent comme valables à titre d'hypothèses de travail, en première approximation, il est nécessaire d'en ajouter une dernière concernant l'altitude de formation des mésons. On peut admettre que ce phénomène a lieu après que les rayons primaires ont traversé une certaine quantité d'atmosphère, nous exprimerons celle-ci

en fractions de l'atmosphère totale  $fh_0$ , où  $h_0$  vaut 10,33 m d'eau, pression normale au niveau de la mer et où  $f$  est une fraction décimale de l'ordre de 1 à 3 dixièmes.

Les divers auteurs qui ont étudié la question ont admis que  $fh_0$  était indépendant de l'énergie du rayonnement, ceci sera discuté plus loin, à la suite des résultats obtenus, nous l'admettrons provisoirement.

Examinons quelles conséquences on peut déduire de ces considérations :

En un point de l'atmosphère où la pression est égale à  $h$  m d'eau, la quantité de matière traversée varie avec l'angle d'incidence  $\theta$  comme  $h \sec \theta$ .

La répartition angulaire du rayonnement primaire, initialement isotrope, dépend donc de  $\theta$  quand on descend dans l'atmosphère, les courbes correspondantes devenant de plus en plus pointues conformément au processus bien connu de filtration du rayonnement.

En des conditions que nous appellerons CORRESPONDANTES c'est-à-dire pour lesquelles  $h_i \sec \theta_i = h_j \sec \theta_j$ , LES RÉPARTITIONS SPECTRALES DU RAYONNEMENT PRIMAIRE SERONT IDENTIQUES, il en sera de même pour les mésons créés en ces points.

La dernière hypothèse faite introduisant la quantité  $fh_0$  définissant le point où sont créés les mésons nous donne la pression  $h_F$  en ce point on a en effet si  $\theta$  est la direction observée :

$$h_F \sec \theta = fh_0 \quad \text{soit} \quad h_F = fh_0 \cos \theta.$$

Il s'ensuit que l'altitude de formation des mésons d'énergie donnée  $E$  varie avec l'angle  $\theta$ , ceci reste vrai même si l'on n'admet pas que  $fh_0$  soit indépendant de  $E$ .

LES POINTS DE FORMATION DES MÉSONS ainsi définis SONT CORRESPONDANTS, on en déduit que l'intensité initiale du rayonnement des mésons d'énergie  $E$  est indépendante de l'angle  $\theta$ . Ceci n'est pas absolument rigoureux par suite de la désintégration, les mésons d'énergie  $E$  ne sont pas tous créés en un point déterminé correspondant à  $h_F$  mais le long d'un certain trajet dans la direction  $\theta$ , plus exactement  $fh_0$  correspond à la HAUTEUR MOYENNE DE PRODUCTION des mésons, celle où la probabilité de production de mésons capables de traverser l'appareil est égale à celle de leur disparition par désintégration par unité de longueur ou de masse d'air traversées.

Quand on parlera dans ce qui suit d'altitude de formation du rayonnement il sera sous-entendu, sauf spécification contraire, que c'est de cette altitude moyenne dont il s'agit et nous admettrons pour l'instant que la conclusion ci-dessus relative à l'intensité initiale du rayonnement est exacte.

**3° Calcul de la probabilité de disparition du Méson.** — Il ne nous reste plus pour pouvoir l'effectuer qu'à connaître la relation liant la pres-

sion  $h$  en chaque point à son altitude  $X$ , on sait qu'elle est de la forme (\*) :

$$h = h_0 \exp. \{ -X/K \} \quad [9]$$

la quantité  $K$  homogène à une longueur vaut 8,33 km si l'on exprime  $X$  à partir du niveau de la mer dans cette unité.  $h_0$  est alors égal à la pression au niveau de la mer soit à 10,33 m d'eau.

Le long d'une trajectoire faisant un angle  $\theta$  avec la verticale prenons deux points  $M$  et  $N$  d'altitudes  $X_m$  et  $X_n$  où les pressions respectives sont  $h_m$  et  $h_n$  (fig. 6). Soit  $X_n > X_m$  on va calculer dans le cas de rayons monocinétiques la diminution relative d'intensité du rayonnement  $I_M/I_N$ .

Soient  $E_m, E_n$  et  $E_i$  les énergies du rayonnement en  $M$ , en  $N$ , et en  $I$  point quelconque situé entre  $M$  et  $N$ , d'altitude  $X_i$ , et où la pression est égale à  $h_i$ , l'énergie  $E_i$  égale :

$$E_i = E_m + \varepsilon(h_m - h_i) \sec \theta \quad [10]$$

où  $\varepsilon$  représente la perte d'énergie par mètre d'eau équivalent.

La probabilité élémentaire de désintégration le long du trajet  $dl$  à partir du point  $I$  est :

$d\Pi = dl/L_i$  où  $L_i$  est le parcours moyen des rayons d'énergie  $E_i$ , d'après la formule [8].

$$L_i = \frac{\tau_0 c}{\mu_0 c^2} E_i = (\tau_0 c / \mu_0 c^2) \times [E_m + \varepsilon(h_m - h_i) \sec \theta]. \quad [11]$$

Au lieu des hauteurs  $X_m, X_n, X_i$  définissons les points  $MNI$  par leurs abscisses  $l_m = X_m \sec \theta$ ,  $l_n = X_n \sec \theta$ ,  $l_i = X_i \sec \theta$  en kilomètres, comptées positivement à partir du niveau de la mer  $O(X=0, h=h_0)$ .

La probabilité totale  $\Pi$  de disparition du rayonnement entre  $M$  et  $N$  est donc :

$$\Pi = \int_{l_n}^{l_m} dl_i / L_i = \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \int_{l_n}^{l_m} \frac{dl_i}{E_m + \varepsilon(h_n - h_i) \sec \theta}. \quad [12]$$

La formule [9] donne immédiatement :  $dl = K \sec \theta dh_i / h_i$ , en remplaçant  $dl$  par cette valeur, et en posant :

$$\eta = \frac{E_m + \varepsilon h_m \sec \theta}{\varepsilon \sec \theta} \quad [13]$$

la formule [12] donne :

$$\Pi = \frac{\mu_0 c^2 K}{\tau_0 c} \frac{1}{\varepsilon} \int_{h_n}^{h_m} \frac{dh_i}{h_i(\eta - h_i)} \quad [14]$$

(\*) Cette formule est valable dans la troposphère c'est-à-dire pour des altitudes inférieures ou égales à 10 km soit  $h \geq 3m.H_2O$ , son emploi est légitimé pour les résultats obtenus chapitre VI indiquant pour la hauteur moyenne de formation des Mésons arrivant au sol des valeurs de cet ordre.

soit après une intégration simple :

$$\Pi = \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K}{\varepsilon} \frac{1}{\eta} \left[ \text{Log}_e \frac{\eta - h_i}{h^i} \right]_{h_m}^{h_n} = \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K}{\varepsilon \eta} \text{Log}_e \frac{(\eta - h_n) h_m}{(\eta - h_m) h_n} \quad [15]$$

en remplaçant  $\eta$  par sa valeur il vient finalement :

$$\Pi = \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_m + \varepsilon h_m \sec \theta} \text{Log}_e \frac{h_m E_m + \varepsilon \sec \theta (h_m - h_n)}{E_m} \quad [16]$$

En remarquant que  $E_m + \varepsilon \sec \theta (h_m - h_n)$  est égal à  $E_n$  et que  $(E_m + \varepsilon h_m \sec \theta)$  est l'énergie qu'aurait le rayonnement à son entrée dans l'atmosphère s'il était primaire ou formé en ce point, énergie que nous appellerons  $E_t$  (Energie totale) on arrive à la formule simple suivante :

$$\Pi = \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_t} \text{Log}_e \frac{h_m E_n}{h_n E_m} \quad [17]$$

La diminution relative d'intensité cherchée  $I_M/I_N = e^{-\Pi}$  donc :

$$\text{Log}_e I_N/I_M = \Pi = \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_t} \text{Log}_e \frac{h_m E_n}{h_n E_m} \quad [18]$$

En tenant compte de la formule [9] reliant les pressions aux altitudes on peut mettre cette formule sous une autre forme faisant apparaître explicitement la longueur du trajet  $MN = l_n - l_m$  :

$$\text{Log}_e I_N/I_M = \frac{1}{\tau_0 c} \frac{\mu_0 c^2}{E_t} \left[ (l_n - l_m) + K \sec \theta \text{Log}_e \frac{E_n}{E_m} \right] \quad [19]$$

C'est l'une ou l'autre de ces deux formules que nous utiliserons par la suite, remarquons qu'elles ont été établies en admettant qu'en N la radiation ne contient plus de primaires en proportion appréciable et qu'il n'y a pas de Mésons créés entre M et N, condition qui est réalisée si la première est remplie, points qui seront examinés ultérieurement.

Si l'on considère au lieu de N quelconque le point F de formation des mésons on a alors :  $h_n = h_f = f h_0 \cos \theta$ ,  $E_n = E_f$  énergie initiale des rayons et la formule [18] devient :

$$\text{Log}_{10} I_M/I_N = \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_t} \text{Log}_{10} \frac{f h_0 E_m}{h_m \sec \theta E_f} \quad [20]$$

Ce qui précède concerne des rayons monocinétiques, en pratique les mesures porteront sur un spectre borné seulement du côté des faibles énergies, ou compris entre deux limites  $E_1$  et  $E_2$ . On aura dans le premier cas :

$$\frac{I_M(E_m \geq E_{m_1})}{I_N(E_n \geq E_{n_1})} = \int_{E_{n_1}}^{\infty} S_n(E_n) \left( \frac{h_n E_m}{h_m E_n} \right)^{\frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_t}} dE_n / \int_{E_{n_1}}^{\infty} S_n(E_n) dE_n \quad [21]$$

où :

$$= \int_{E_{m_1}}^{\infty} S_m(E_m) dE_m / \int_{E_{m_1}}^{\infty} S_m(E_m) \left( \frac{h_m E_n}{h_n E_m} \right)^{\frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_t}} dE_m \quad [22]$$

suivant que l'on pourra connaître le spectre d'énergie  $S(E)$  en  $N$  ou en  $M$ . La limite inférieure des intégrales est l'énergie minimum nécessaire pour traverser l'appareil et son écran, calculée par la formule [7].

Dans le cas d'une bande d'énergie les formules sont les mêmes mais au lieu d'une limite supérieure infinie pour les intégrales on a l'énergie minimum  $E_{m_2}$  ou  $E_{n_2}$  nécessaire pour traverser l'appareil et l'écran maximum utilisé.

La formule :

$$[23] \quad \frac{I_M(E \geq E_{m_1})}{I_F(E \geq E_{n_1})} = \int_{E_{f_1}}^{\infty} S_f(E_f) \left( \frac{h_f E_m}{h_m E_f} \right)^{\frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_f}} dE_f / \int_{E_{f_1}}^{\infty} S_f(E_f) \left( \frac{h_f E_n}{h_n E_f} \right)^{\frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K \sec \theta}{E_f}} dE_f.$$

qui se déduit aisément de ce qui précède est applicable au cas où l'on connaît, ou l'on suppose connu, le spectre d'énergie des mésons à l'altitude de formation (\*).

**4° Méthodes diverses.** — En généralisant, on voit qu'il suffit en principe de faire deux mesures d'intensité du rayonnement dans deux conditions différentes quelconques pour en déduire une valeur de  $\tau_0/\mu_0$  par comparaison avec le rapport calculé. Certains choix des paramètres, écran, altitude, angle  $\theta$ , sont plus avantageux parce qu'ils peuvent réduire le nombre des hypothèses, ou éviter la connaissance du spectre d'énergie du rayonnement.

Les méthodes utilisées par les différents auteurs se rangent en deux catégories :

a) MÉTHODES A UNE SEULE STATION. — L'altitude restant fixe on fait varier l'angle  $\theta$  et l'on modifie dans chaque cas l'épaisseur de l'écran de manière à maintenir constante la perte totale d'énergie du rayonnement dans l'ensemble atmosphère + écran. C'est la méthode employée le plus généralement jusqu'ici (62) (88) (93) (94), elle nécessite des hypothèses sur la hauteur de formation des mésons ; on peut éviter des hypothèses sur leur spectre d'énergie initial en opérant pour chaque angle  $\theta$  avec deux valeurs d'écran, l'écart constant de ces deux valeurs déterminant une bande d'énergie suffisamment étroite.

b) MÉTHODES A DEUX OU PLUSIEURS STATIONS. — Si les mesures sont effectuées sous le même angle aux deux stations, la différence d'absorption étant compensée par un écran local dans le cas de la station élevée, on évite les hypothèses relatives à la hauteur de formation, on peut de plus éviter la nécessité de connaître le spectre d'énergie par l'emploi de deux

(\*) On a dans ce cas  $E_{m_1} = E_{f_1} - \varepsilon(h_m - h_f) \sec \theta$  et  $E_{n_1} = E_{f_1} - \varepsilon(h_n - h_f) \sec \theta$ .

écrans différents, comme précédemment. Les deux meilleures mesures indirectes de la vie moyenne appartiennent à ce type (70) (78) (voir chap. II, § 2c).

**5° Méthode adoptée.** — Toutes les méthodes précédentes font appel aux écrans équivalents, on remplace une certaine quantité d'air par un écran local dense placé entre ou mieux au-dessus des compteurs. Malgré l'emploi dans les deux dernières mesures citées d'écrans de carbone, ayant par conséquent un nombre atomique voisin de ceux des constituants de l'air et pour lesquels il semble légitime d'admettre l'égalité des pertes d'énergie par ionisation, il subsiste une incertitude au point de vue de la diffusion de ces écrans et de leur action sur le comptage parasite dû aux gerbes, en particulier en altitude, dans le cas des mesures à plusieurs stations.

On évite ici ces inconvénients par une méthode à deux stations d'un type spécial reposant sur la notion des CONDITIONS CORRESPONDANTES précédemment énoncée :

Soient A et B deux stations d'altitude  $X_a$  et  $X_b$  où les pressions respectives sont  $h_a$  et  $h_b$  (v. fig. 7) il suffit de considérer en ces deux points les directions faisant avec la verticale les angles respectifs  $\alpha$  et  $\beta$  tels que :  $h_a \sec \alpha = h_b \sec \beta$  pour se trouver dans des conditions correspondantes, c'est-à-dire pour lesquelles les quantités d'air traversées depuis le sommet de l'atmosphère soient les mêmes.

Ainsi que nous l'avons vu plus haut les points de formation du rayonnement C et D sont aussi des POINTS CORRESPONDANTS et l'on a en ces points  $I_c = I_d$  pour des rayons monochinétiques. Si dans les mesures effectuées aux deux stations on dispose un même écran local filtrant la partie molle du rayonnement on voit que les énergies minimum en A et B sont égales  $E_a = E_b$  ainsi que celles en C, D et les énergies totales :  $E_c = E_d$ ,  $E_{t_a} = E_{t_b}$  les facteurs de réduction dus à la désintégration du rayonnement formule [17], sont donc identiques aux quantités  $\sec \alpha$  et  $\sec \beta$  près. Dans le cas de rayons monochinétiques la formule [20] devient :

$$\log_{10} I_A/I_B = \left( \frac{\mu_0 c^2}{\tau_0 c} \frac{K}{E_t} \log_{10} \frac{f h_0 E_b}{h_b \sec \beta E_d} \right) (\sec \alpha - \sec \beta) \quad [24]$$

Dans le cas d'une bande d'énergie à limites finies ou non il faut connaître le spectre des Mésons à leur formation ou l'étudier en A ou B dans la direction voulue.

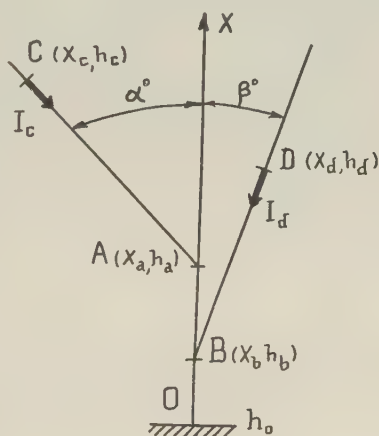


FIG. 7.

En opérant avec deux épaisseurs d'écran différentes on peut déterminer une bande d'énergie suffisamment étroite pour pouvoir considérer son énergie moyenne  $\bar{E}_a = \bar{E}_b$  d'où l'on déduira  $\bar{E}_c = \bar{E}_a$  et  $\bar{E}_a = \bar{E}_b$ .

La comparaison de cette formule, calculée pour diverses valeurs de  $f h_0$ , avec le  $\log_{10} (I_A/I_B)$  expérimental, conduira à autant de valeurs de  $\tau_0/\mu_0 = f(f h_0)$  si l'on admet pour  $\mu_0$  la valeur 200 on aura alors  $\tau_0 = f(f h_0)$ .

Si l'on possède deux courbes de répartition angulaire en A et en B du rayonnement, compris dans une bande d'énergie on peut en déduire une infinité de couples de valeurs correspondantes de  $\alpha$  et  $\beta$ , conduisant à autant de valeurs de  $\tau_0/\mu_0$ , correspondant à des valeurs de  $E_i$  croissant avec l'angle dans de grandes limites.

Considérée comme une mesure de  $\tau_0/\mu_0$  cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter une estimation de la hauteur de production du rayonnement, mais elle permet d'opérer avec des angles supérieurs à ceux possibles avec les méthodes d'écrans équivalents, où l'on est limité dans cette voie par l'importance croissante de l'écran local nécessaire. Ce dernier devant être placé de préférence au-dessus des compteurs, à cause de la diffusion c'est-à-dire en un point où la surface à couvrir, plus grande que celles des compteurs augmente avec la distance. Dans le cas des mesures ordinaires aux deux stations on a d'autre part besoin de cet écran à la station élevée, généralement la moins bien outillée et la moins accessible.

Une erreur possible sur l'estimation de l'équivalence des écrans n'a que peu d'importance dans notre cas, puisqu'ils ne servent plus qu'à définir une énergie moyenne locale, petite vis-à-vis de celle du rayonnement au cours de la traversée de l'atmosphère, principalement aux grands angles.

De même l'importance de l'effet de diffusion des écrans est réduite, ainsi que l'effet des gerbes, puisque les écrans sont égaux et occupent la même position par rapport aux compteurs dans les deux stations.

Enfin cette méthode permet si l'on suppose  $\tau_0$  connu par les mesures directes ou par les mesures indirectes ne faisant pas intervenir  $f h_0$  de déterminer cette hauteur de formation du rayonnement c'est à quoi nous l'utiliserons chapitre VI.

**6° Méthode graphique.** — Un graphique permet de déterminer rapidement sans calcul les quantités  $X_a, X_b, X_c, X_d, h_c, h_d, l_a, l_b, l_c, l_d, \alpha, \beta$ , ainsi que la différence de marche des deux rayons, pour les différentes valeurs de  $f h_0$  en fonction de  $h_a$  et  $h_b$ .

L'atmosphère étant tout d'abord supposée homogène, on porte le long de la verticale  $OO'$  le nombre de mètres d'eau  $O$  correspond à  $h = 0$  sommet de l'atmosphère  $O'$  à  $h = h_0 = 10,33 \text{ mH}_2\text{O}$ , niveau de la mer.

On porte horizontalement à partir de  $O'$  des longueurs égales à  $h_0 \tan \theta$ , cet axe est gradué directement en degrés.

On porte horizontalement à partir de  $O$  l'altitude  $X$  en kilomètres, la courbe  $\varepsilon$  représente la fonction barométrique  $X = \varphi(h)$  de la formule [9].

Chaque station d'observation, caractérisée par sa pression  $h$  est repré-

sentée par une droite horizontale, sur la figure les deux droites  $h_a h'_a$ ,  $h_b h'_b$  correspondent aux deux stations A et B pour lesquelles  $h_a = 6,82 \text{ m H}_2\text{O}$  et  $h_b = 10,24 \text{ m H}_2\text{O}$ .

Remarquons que toutes les conditions correspondantes figurent sur un cercle de centre O ayant pour rayon la quantité d'air traversée ; on a tracé sur le graphique ceux qui correspondent aux valeurs de  $fh_0$  envisagées.

Donnons quelques exemples d'utilisation de ce graphique :

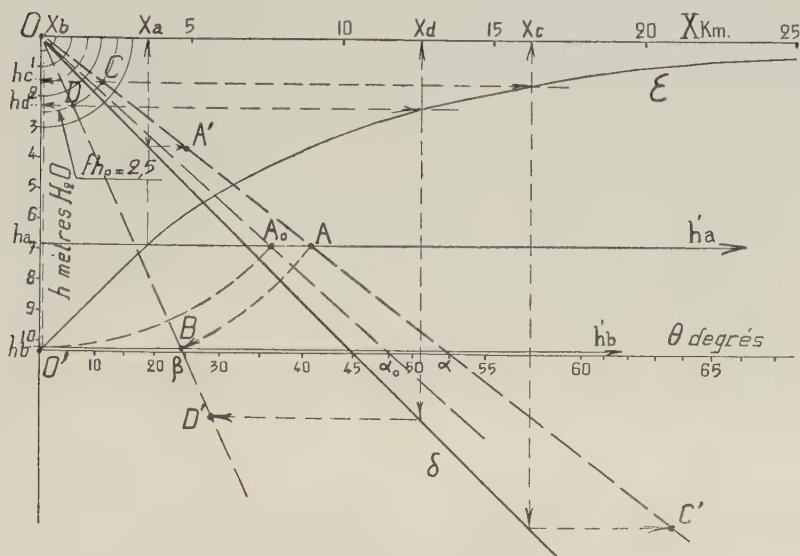


FIG. 8. — Abaque utilisé pour la détermination graphique des divers éléments.

**ALTITUDE DES POINTS D'OBSERVATION.** — La courbe  $\varepsilon$  donne immédiatement les altitudes  $X_i$  correspondant aux pressions  $h_i$  et inversement, en particulier  $X_a = 3,5 \text{ km}$  et  $X_b = 0,075 \text{ km}$  pratiquement confondu avec O.

**CONDITIONS CORRESPONDANTES AUX DEUX STATIONS.** — On a vu qu'elles étaient situées sur un même cercle, soit un point A sur  $h_a h'_a$  le cercle de rayon OA coupe  $h_b h'_b$  en B correspondant, les angles  $\alpha$  et  $\beta$  sont donnés par intersections de OA et OB avec l'axe des  $\theta$ .

**ANGLE LIMITE EN A.** — C'est celui qui correspond à  $\beta = 0^\circ$  le cercle de  $Oh_b$  coupe la droite  $h_a h'_a$  en  $A_0$  point limite en A, le rayon  $OA_0$  coupe l'axe des  $\theta$  au point  $\alpha_0$  cherché. On trouve  $\alpha_0 = 48^\circ 10'$ .

**HAUTEURS DE FORMATION ET PRESSIONS CORRESPONDANTES.** — Soit :

$$fh_0 = 2,5 \text{ m H}_2\text{O}$$

OA coupe le cercle de rayon  $2,5 \text{ m H}_2\text{O}$  en c ; on en déduit  $h = 1,5 \text{ m H}_2\text{O}$

et  $X_c = 15,2$  km, une construction identique donne  $h_a = 2,3$  m H<sub>2</sub>O et  $X_a = 12,6$  km.

QUANTITÉS D'AIR TRAVERSÉES. — Elles sont en vraie grandeur le long des rayons OA et OB, à l'échelle des mètres d'eau  $h$ . On voit en particulier que l'on a :  $CA = DB$ , les trajets des deux rayons correspondent bien à la traversée d'une même quantité d'air.

LONGUEUR DES TRAJETS EN VRAIE GRANDEUR. — Calculons  $l_c$ , on sait qu'il est égal à  $X_c \sec \alpha$ ,  $l_c = OC'$  mesuré à la même échelle que les  $X_i$ .  $C'$  est obtenu par un rappel de  $X_c$  sur la droite à  $45^\circ$  O $\delta$ ; on peut de même obtenir  $l_a = OA'$  de la même manière; on a donc  $l_c - l_a = A'C' = 20,25$  km.

Des constructions identiques pour la deuxième station donnent les points D' et B' (qui n'a pas été figuré ici, étant ainsi que Xb pratiquement confondu avec O) on a donc :  $l_a - l_b = OD' - OB' \simeq OD' = 13,55$  km. La différence de marche des deux rayons est donc égale à : 6,7 km.

Ce graphique a rendu des services pour les calculs préliminaires, il permet de se rendre compte rapidement de la variation de la hauteur et de la pression de formation.

Il peut être utilisé sans modifications dans le cas d'un nombre quelconque de stations.

#### IV. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

1° *Mesures en altitude*. — (Station A,  $h_0 = 6,82$  m H<sub>2</sub>O, Jungfraujoch, avril-mai 1939). Le dispositif expérimental décrit Chapitre I<sup>er</sup> a été employé. Les mesures effectuées à des angles  $\alpha = 0,44$  et  $63^\circ$  sont résumées tableau III.

Le nombre des coïncidences par 100 minutes, corrigé des gerbes, figure dans la colonne 8 de ce tableau.

L'examen des résultats partiels dont le nombre pour chaque mesure est indiqué colonne 4 conduit à une dispersion normale et ne permet pas de déceler de dérive de l'appareil au cours des mesures, l'effet d'une telle dérive aurait d'ailleurs été compensé automatiquement par le croisement systématique des différentes mesures. On n'a pas effectué la correction barométrique, qui n'affecte par suite du croisement que le niveau d'ensemble des mesures, nous y reviendrons lors de la discussion.

Plusieurs séries de mesures complémentaires ont été faites au niveau de la mer, elles figurent tableau IV.

TABLEAU III. — Mesures en altitude, station A.

| 1  | 2<br>$\alpha$<br>degrés | 3<br>Ecran<br>cm Pb | 4<br>Nombre<br>de<br>mesures | 5<br>$\Delta T$<br>total<br>minutes | 6<br>$\Delta N$<br>total<br>coïncidences | 7<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$ | 8<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$<br>corrige des gerbes | 9<br>Observations                                                                                     |
|----|-------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 0                       | 14                  | 1                            | 205                                 | 135                                      | 66 $\pm$ 5,7                                                                                  | 63 $\pm$ 6                                                                                                          | $\left. \begin{array}{l} - 3 \\ - 2,8 \\ - 2,7 \\ - 2,5 \\ - 2,5 \end{array} \right\} \text{Gerbes.}$ |
| 2  | 0                       | 30                  | 5                            | 1.428                               | 747                                      | 52,5 $\pm$ 1,9                                                                                | 49,7 $\pm$ 2                                                                                                        |                                                                                                       |
| 3  | 0                       | 40                  | 7                            | 2.723                               | 1.353                                    | 49,8 $\pm$ 1,35                                                                               | 47,1 $\pm$ 1,5                                                                                                      |                                                                                                       |
| 4  | 0                       | 70                  | 7                            | 2.797                               | 940                                      | 33,6 $\pm$ 1,1                                                                                | 31,1 $\pm$ 1,2                                                                                                      |                                                                                                       |
| 5  | 0                       | 100                 | 8                            | 3.986                               | 1.634                                    | 26 $\pm$ 0,8                                                                                  | 23,5 $\pm$ 1                                                                                                        |                                                                                                       |
| 6  | 0                       | 100                 | 1                            | 682                                 | 17                                       | 2,5 $\pm$ 0,6                                                                                 |                                                                                                                     | Gerbes.                                                                                               |
| 7  | 44                      | 14                  | 5                            | 3.126                               | 1.001                                    | 32,1 $\pm$ 1                                                                                  | 29 $\pm$ 1                                                                                                          | Compteur 1.                                                                                           |
| 8  | 44                      | 40                  | 7                            | 3.881                               | 883                                      | 22,8 $\pm$ 0,77                                                                               | 19,8 $\pm$ 0,9                                                                                                      | $\left. \begin{array}{l} - 3 \\ - 3 \end{array} \right\} \text{Gerbes.}$                              |
| 9  | 44                      | 74                  | 7                            | 5.824                               | 1.116                                    | 19,12 $\pm$ 0,57                                                                              | 16,1 $\pm$ 0,6                                                                                                      |                                                                                                       |
| 10 | 44                      | 74                  | 1                            | 220                                 | 6                                        | 2,73 $\pm$ 1,1                                                                                |                                                                                                                     | Gerbes.                                                                                               |
| 11 | 64                      | 14                  | 7                            | 3.991                               | 490                                      | 12,27 $\pm$ 0,55                                                                              | 8,6 $\pm$ 0,6                                                                                                       | Gerbes.                                                                                               |
| 12 | 64                      | 14                  | 3                            | 1.095                               | 40                                       | 3,65 $\pm$ 0,6                                                                                |                                                                                                                     |                                                                                                       |
| 13 | 90                      | 14                  | 1                            | 96                                  | 6                                        | 6,25 $\pm$ 2,5                                                                                |                                                                                                                     |                                                                                                       |

TABLEAU IV. — Mesure de contrôle des mesures en altitude, station B.

| 1  | 2<br>θ<br>degrés | 3<br>Ecran<br>Pb<br>cm | 4<br>Nb.<br>de<br>mesures | 5<br>$\Delta T$<br>(total)<br>minutes | 6<br>$\Delta N$<br>(total)<br>coïncidences | 7<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$ | 8<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$<br>corrige<br>des gerbes | 9<br>Observations                                          |
|----|------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 1  | 0                | 0                      | 2                         | 156                                   | 73                                         | 46,8 ± 5,5                                                                                    | 45 ± 5,7                                                                                                               | Mesures<br>juin-juillet<br>1939<br><br>— gerbes            |
| 2  | 0                | 5                      | 10                        | 7.388                                 | 2.914                                      | 39,6 ± 0,74                                                                                   | 37,85 ± 0,9                                                                                                            |                                                            |
| 3  | 0                | 35                     | 8                         | 8.113                                 | 2.261                                      | 27,8 ± 0,6                                                                                    | 26 ± 0,7                                                                                                               |                                                            |
| 4  | 0                | 65                     | 6                         | 9.522                                 | 1.856                                      | 19,5 ± 0,45                                                                                   | 17,75 ± 0,6                                                                                                            |                                                            |
| 5  | 0                | 100                    | 1                         | 1.319                                 | 194                                        | 14,7 ± 1                                                                                      | 13 ± 1,1                                                                                                               |                                                            |
| 6  | 0                | 5                      | 1                         | 4.410                                 | 77                                         | 1,75 ± 0,2                                                                                    | ↓                                                                                                                      |                                                            |
| 7  | 44               | 0                      | 2                         | 1.393                                 | 280                                        | 20,1 ± 1,2                                                                                    | 18,1 ± 1,3                                                                                                             |                                                            |
| 8  | 44               | 5                      | 6                         | 7.444                                 | 1.378                                      | 18,51 ± 0,5                                                                                   | 16,5 ± 0,6                                                                                                             |                                                            |
| 9  | 44               | 40                     | 5                         | 6.751                                 | 977                                        | 14,5 ± 0,46                                                                                   | 12,5 ± 0,5                                                                                                             |                                                            |
| 10 | 90               | 0                      | 1                         | 2.432                                 | 55                                         | 2,26 ± 0,3                                                                                    | ↓                                                                                                                      |                                                            |
| 11 | 0                | 0                      | 6                         | 1.147                                 | 559                                        | 48,8 ± 2                                                                                      | 47 ± 2,2                                                                                                               | Moyennes<br>Mesures nov. 38<br>et janv. 39<br><br>— gerbes |
| 12 | 0                | 5                      | 10                        | 4.972                                 | 1.904                                      | 38,3 ± 0,9                                                                                    | 36,5 ± 1,1                                                                                                             |                                                            |
| 13 | 0                | 20                     | 1                         | 1.281                                 | 431                                        | 33,6 ± 1,7                                                                                    | 31,8 ± 1,9                                                                                                             |                                                            |
| 14 | 0                | 65                     | 6                         | 6.791                                 | 1.261                                      | 18,6 ± 0,53                                                                                   | 16,8 ± 0,7                                                                                                             |                                                            |
| 15 | 0                | 5                      | 1                         | 1.203                                 | 23                                         | 1,8 ± 0,4                                                                                     | ↓                                                                                                                      |                                                            |

TABLEAU V. — Mesures au niveau de la mer, station B.

| 1  | 2<br>β<br>degrés | 3<br>Ecran<br>Pb<br>cm | 4<br>Nombre<br>de<br>mesures | 5<br>ΔT<br>total<br>minutes | 6<br>$\frac{\Delta N}{\Delta T}$<br>total<br>coinci-<br>dences | 7<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$ | 8<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$<br>(gerbes déduites) | 9<br>Pression<br>moyenne<br>mm Hg | 10<br>$\left(\frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T}\right) \times 100$<br>pour 753 mm Hg | 11<br>Observations            | 12    |
|----|------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------|
| 1  | 0                | 0                      | 4                            | 3.672                       | 1.940                                                          | 52,8 ± 1,2                                                                                    | 51,2 ± 1,25                                                                                                        | 760,0                             | 52,3 ± 1,3                                                                                                       |                               | 3/4   |
| 2  | 0                | 10                     | 11                           | 9.570                       | 3.713                                                          | 38,8 ± 0,64                                                                                   | 37,2 ± 0,7                                                                                                         | 757,5                             | 37,7 ± 0,7                                                                                                       |                               | 10/11 |
| 3  | 0                | 35                     | 6                            | 6.135                       | 1.722                                                          | 28,07 ± 0,69                                                                                  | 26,47 ± 0,72                                                                                                       | 753,65                            | 26,47 ± 0,72                                                                                                     |                               | 5/6   |
| 4  | 0                | 70                     | 12                           | 13.550                      | 2.741                                                          | 20,23 ± 0,39                                                                                  | 19,03 ± 0,4                                                                                                        | 756,2                             | 19,2 ± 0,4                                                                                                       |                               | 12/12 |
| 5  | 0                | 100                    | 15                           | 21.028                      | 3.558                                                          | 16,92 ± 0,28                                                                                  | 15,72 ± 0,3                                                                                                        | 756,9                             | 16,05 ± 0,3                                                                                                      |                               | 11/15 |
| 6  | 0                | 130                    | 11                           | 13.820                      | 1.982                                                          | 14,34 ± 0,32                                                                                  | 13,71 ± 0,35                                                                                                       | 757,7                             | 13,9 ± 0,35                                                                                                      |                               | 11/11 |
| 7  | 30°20'           | 10                     | 5                            | 7.492                       | 2.263                                                          | 30,20 ± 0,63                                                                                  | 28,6 ± 0,7                                                                                                         | 751,3                             | 29,4 ± 0,7                                                                                                       |                               | 4/5   |
| 8  | "                | 30                     | 4                            | 5.384                       | 1.174                                                          | 21,80 ± 0,64                                                                                  | 20,2 ± 0,7                                                                                                         | 755                               | 20,25 ± 0,7                                                                                                      |                               | 4/4   |
| 9  | "                | 70                     | 7                            | 10.016                      | 1.787                                                          | 17,84 ± 0,42                                                                                  | 16,42 ± 0,45                                                                                                       | 759,3                             | 16,8 ± 0,46                                                                                                      |                               | 7/7   |
| 10 | "                | 100                    | 7                            | 12.695                      | 1.816                                                          | 14,30 ± 0,34                                                                                  | 12,85 ± 0,4                                                                                                        | 759,9                             | 13,15 ± 0,41                                                                                                     |                               | 7/7   |
| 11 | 43°15'           | 10                     | 10                           | 10.350                      | 2.076                                                          | 20,0 ± 0,44                                                                                   | 18,3 ± 0,5                                                                                                         | 755,5                             | 18,5 ± 0,5                                                                                                       |                               | 0/10  |
| 12 | "                | 40                     | 4                            | 4.579                       | 723                                                            | 15,8 ± 0,59                                                                                   | 14,1 ± 0,63                                                                                                        | 757,4                             | 14,32 ± 0,65                                                                                                     |                               | 3/4   |
| 13 | "                | 70                     | 6                            | 8.602                       | 1.135                                                          | 13,19 ± 0,39                                                                                  | 11,49 ± 0,42                                                                                                       | 757,5                             | 11,7 ± 0,43                                                                                                      |                               | 5/6   |
| 14 | 54°30'           | 10                     | 15                           | 29.805                      | 4.318                                                          | 14,5 ± 0,22                                                                                   | 12,75 ± 0,25                                                                                                       | 754,3                             | 12,82 ± 0,25                                                                                                     |                               | 12/15 |
| 15 | 75               | 10                     | 1                            | 1.325                       | 48                                                             | 3,62 ± 0,53                                                                                   | 2,42 ± 0,6                                                                                                         | 755,3                             | 2,46 ± 0,6                                                                                                       |                               |       |
| 16 | 90               | 10                     | 1                            | 3.079                       | 45                                                             | 1,46 ± 0,21                                                                                   | ∞                                                                                                                  | 762                               | ∞                                                                                                                |                               |       |
| 17 | 0                | 0                      | 2                            | 3.116                       | 1.523                                                          | 48,9 ± 1,25                                                                                   | 47,5 ± 1,35                                                                                                        | 761,8                             | 48,7 ± 1,4                                                                                                       |                               |       |
| 18 | 0                | 10                     | 2                            | 3.381                       | 1.366                                                          | 39,8 ± 1,1                                                                                    | 38,8 ± 1,15                                                                                                        | 759                               | 39,5 ± 1,2                                                                                                       |                               |       |
| 19 | 0                | 35                     | 2                            | 1.514                       | 453                                                            | 29,9 ± 1,4                                                                                    | 29,2 ± 1,45                                                                                                        | 757,6                             | 29,6 ± 1,45                                                                                                      |                               |       |
| 20 | 54°30'           | 10                     | 6                            | 11.389                      | 1.770                                                          | 15,54 ± 0,75                                                                                  | 13,54 ± 0,85                                                                                                       | 743,9                             | 13,0 ± 0,9                                                                                                       | Mesures<br>hors du<br>support | 6/6   |

Ces mesures permettent de comparer en valeur absolue les résultats obtenus aux deux stations.

**2° Mesures au niveau de la mer.** — (Station B  $h_b = 10,24$  m  $H_2O$ , Paris, mai-décembre 1941). L'appareil a été monté sur la terrasse du Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure, à l'altitude de 75 m, dans une cabane démontable dont les parois de bois de 2 cm d'épaisseur et le toit de carton bitumé présentent une absorption équivalente à 1 cm d'eau, soit 0,15 cm de plomb, négligeable pour les rayons étudiés. L'atmosphère y est maintenue sèche au moyen d'un radiateur électrique qui peut être commandé en totalité ou en partie par un thermostat dont l'organe sensible est monté au centre de la cabane sur le bâti C de l'appareil.

Le plan des compteurs a été incliné en direction du Sud-Ouest, orientation déjà utilisée dans les mesures en altitude, où elle était conditionnée par la situation du laboratoire à flanc de montagne.

L'effet des gerbes, plus faible qu'en altitude, a permis d'utiliser l'envergure totale de l'appareil sans précautions spéciales, les gerbes ont été cependant mesurées systématiquement avec les différents écrans et angles utilisés.

Les angles  $\beta = 0,30^\circ 20'$ ,  $43^\circ 15'$  et  $54^\circ 30'$  utilisés avaient été initialement choisis en vue de l'utilisation d'une méthode d'écrans équivalents sans interpolation des résultats expérimentaux.

Un enregistrement continu de la pression atmosphérique, contrôlé périodiquement au moyen d'un baromètre à mercure, a permis d'effectuer la correction barométrique, de faible importance, dont le détail est exposé § 3 de ce chapitre.

Le résultat général des mesures figure dans le tableau V, colonne 10. On trouvera d'autre part tableau VI le résumé des diverses mesures de gerbes, la disposition expérimentale adoptée dans chaque cas est indiquée figure 9.

TABLEAU VI. — Mesures des gerbes au niveau de la mer, station B.

| 1 | 2<br>$\beta$<br>degrés | 3<br>Nombre<br>de<br>mesures | 4<br>$\Delta T$ total<br>minutes | 5<br>$\Delta N$ total<br>coincidences | 6<br>$\left( \frac{\Delta N}{\Delta T} \pm \frac{\sqrt{\Delta N}}{\Delta T} \right)$<br>$\times 100$ | 7<br>Conditions<br>d'expérience |
|---|------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 0                      | 5                            | 15.930                           | 100                                   | $0,63 \pm 0,06$                                                                                      | Voir figure 7 a.                |
| 2 | 0                      | 4                            | 12.967                           | 155                                   | $1,20 \pm 0,1$                                                                                       | » b.                            |
| 3 | 50                     | 4                            | 14.092                           | 246                                   | $1,75 \pm 0,11$                                                                                      | » c.                            |
| 4 | $30^\circ 20'$         | 1                            | 5.715                            | 81                                    | $1,42 \pm 0,16$                                                                                      | » d.                            |
| 5 | $54,30$                | 3                            | 3.839                            | 76                                    | $1,98 \pm 0,23$                                                                                      | » e.                            |
| 6 | 75                     | 1                            | 996                              | 12                                    | $1,2 \pm 0,11$                                                                                       | » f.                            |
| 7 | 0                      | 1                            | 4.221                            | 1                                     | 0,024                                                                                                | Coïncidences fortuites.         |

Les coïncidences fortuites, mesure n° 7, tableau VI, ont été mesurées par une méthode indiquée par Maze (34) : les trois compteurs sont branchés sur les trois premiers relaxateurs 1, 2 et 3 du sélecteur, en reliant la grille de la deuxième lampe du relaxateur 3 à la grille homologue du quatrième par une résistance de 12 mégohms, le fonctionnement de ce dernier est asservi au précédent mais la constante de temps du circuit de liaison introduit un retard de l'ordre de 2,  $10^{-5}$  sec, soit 20 fois le pouvoir séparateur de l'appareil, dans le fonctionnement du quatrième relaxateur. Le nombre de coïncidences entre les relaxateurs 1, 2 et 4, est une mesure directe des fortuites dans les conditions mêmes d'utilisation de l'appareil.

Le chiffre trouvé est de l'ordre de quatre fois celui qui correspond aux mesures normales, le pouvoir de résolution de l'appareil ayant été diminué de moitié, lors de cette mesure, pour des raisons étrangères à ce travail. La valeur probable du nombre de coïncidences fortuites est donc de 0,006 par 100 minutes, absolument négligeable par rapport au nombre des gerbes.

**3° Correction barométrique.** — La variation de la pression atmosphérique est liée à celles de divers facteurs météorologiques, en particulier à celle de la température, la corrélation entre les deux, négative en hiver, devient positive en été. A température constante le rayonnement diminue quand la pression augmente et inversement.

A pression constante, une augmentation de température entraîne une diminution du rayonnement, l'altitude de formation des mésons devenant plus grande.

L'effet de température est plus faible en valeur absolue que l'effet barométrique mais il peut arriver à masquer ce dernier en hiver et l'exagérer en été. Une étude précise de l'effet barométrique est illusoire tant que l'on se borne à enregistrer la température au sol, il faut pouvoir la connaître en altitude par des sondages aérologiques répétés. Au moment où nos mesures ont été entreprises, les résultats obtenus par divers auteurs, au moyen de chambres d'ionisation ou de compteurs, avec ou sans écrans absorbants, n'étaient pas très concordants. Rossi (67) donne un tableau de ces diverses mesures, il faut y joindre celles de Clay et Van Gehmert (65) indiquant l'accroissement du coefficient de variation avec l'angle.

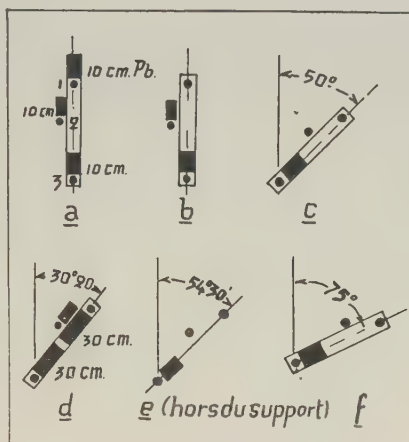


FIG. 9. — Dispositifs utilisés dans les mesures de gerbes au niveau de la mer.

Il était donc désirable de faire une étude systématique de la question pour les divers angles utilisés.

Dans chaque cas, en portant sur un graphique la valeur moyenne de chaque mesure partielle en fonction de la pression moyenne correspondante, on peut espérer par la méthode des moindres carrés trouver le coefficient cherché. Mais cette méthode qui indique, ainsi que nous l'avons constaté, une nette corrélation, n'est pas assez précise, le nombre de coïncidences de chaque mesure partielle ainsi que leur nombre étant trop faibles.

Un deuxième appareil a donc été monté à côté du premier. Comprenant 3 compteurs de fabrication Maze, longueur utile 400 mm, diamètre intérieur 38 mm, surface utile 150 cm<sup>2</sup>, l'écartement des compteurs extrêmes étant de 230 mm., 10 cm de plomb sont placés entre les compteurs 1 et 2, un blindage sépare les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> compteurs. Le plan des compteurs peut être incliné à volonté d'un angle quelconque par rapport à la verticale.

Un sélecteur du type Neher et Harper à trois directions transmet, par une ligne aérienne unifilaire, les chocs dus aux coïncidences à la grille d'un thyatron actionnant un numérateur, cette dernière partie de l'appareil est placée à l'intérieur du laboratoire.

TABLEAU VII. — *Effet barométrique des mésons en direction verticale.*

$\theta = 0^\circ$  Ecran 10 cm Pb.

|    | $\Delta T$<br>minutes | $\Delta N$<br>coïncidences | $\frac{\Delta N}{\Delta T} \times 60$ | P<br>moyenne<br>mm Hg | $\frac{\Sigma P \Delta T}{\Sigma \Delta T}$ |
|----|-----------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| 1  | 426                   | 6.736                      | 951,5                                 | 761,2                 | 762,51                                      |
| 2  | 990                   | 15.541                     | 941,9                                 | 761,9                 |                                             |
| 3  | 384                   | 6.146                      | 960,3                                 | 762                   |                                             |
| 4  | 1.009                 | 15.541                     | 928,6                                 | 763,2                 |                                             |
| 5  | 76                    | 1.202                      | 948,9                                 | 764                   |                                             |
| 6  | 346                   | 5.416                      | 939,2                                 | 763,8                 |                                             |
| 7  | 93                    | 1.442                      | 930,3                                 | 764                   |                                             |
| 8  | 1.200                 | 18.468                     | 923,4                                 | 763                   |                                             |
| 9  | 1.197                 | 18.778                     | 941,2                                 | 762                   |                                             |
|    | 5.721                 | 89.270                     | 936,23 $\pm$ 3,13                     |                       |                                             |
| 10 | 949                   | 15.100                     | 972,84 $\pm$ 4,95                     | 748,7                 | 748,79                                      |
| 11 | 317                   | 5.158                      |                                       | 749                   |                                             |
| 12 | 135                   | 2.169                      |                                       | 748,9                 |                                             |
| 13 | 976                   | 16.114                     |                                       | 748,8                 |                                             |
|    | 2.379                 | 38.541                     |                                       |                       |                                             |

L'enregistrement du nombre des coïncidences est automatique, un appareil cinématographique photographiant toutes les heures le chiffre du numérateur et la pendule servant au déclenchement.

Le nombre de coïncidences ainsi trouvé en direction verticale est de

l'ordre de 950 par heure, suffisamment élevé pour permettre, en cas de variation rapide de la pression, d'appliquer la méthode des moindres carrés aux mesures horaires individuelles. On peut également grouper celles-ci selon leurs pressions moyennes, c'est ce qui a été fait pour les mesures verticales qui ont été séparées en deux groupes : hautes et basses pressions (voir tableau VII).

La variation du nombre de coïncidences est de  $36,61 \pm 6/954,53$  pour une variation de pression égale à : 76,251-74,879 cm de mercure ce qui donne un coefficient de variation égal à :

$$2,8 \pm 0,45 \text{ o/o par centimètre de mercure.}$$

La méthode des moindres carrés appliquée à deux périodes pendant lesquelles la pression avait subi en 24 heures des variations de l'ordre de 1,5 cm a donné des résultats du même ordre.

Nous avons eu alors communication d'un travail de Trumphy et Orlin (68) donnant avec un écran de plomb de 12 cm les résultats suivants (Tableau VIII).

TABLEAU VIII. — *Effet barométrique* (d'après Trumphy et Orlin).

| $\beta$ degrés . . . | 0 | 30  | 45  | 60  |
|----------------------|---|-----|-----|-----|
| o/o par cm Hg .      | 3 | 3,3 | 3,9 | 5,0 |

Notre valeur préliminaire étant en bon accord avec la valeur correspondante de Trumphy et Orlin nos mesures n'ont pas été poursuivies, puisqu'il ne s'agissait que de mesures de correction.

On a donc admis les valeurs trouvées par ces auteurs, elles ont servi à l'obtention des coefficients de correction indiqués colonne 11, tableau V.

A l'altitude de 75 mètres à laquelle est situé l'appareil correspond une pression moyenne égale à 753 mm, les nombres de coïncidences corrigés des gerbes (colonne 8) ont été ramenés à cette pression au moyen des coefficients ainsi trouvés.

**4<sup>e</sup> Critique des mesures.** — a) **STABILITÉ DES MESURES.** — On a indiqué § 1<sup>er</sup> que les mesures en altitude étaient correctes à ce point de vue. On s'en est également assuré pour les mesures au niveau de la mer. Des graphiques dont une partie est reproduite figure 10 représentent, dans chaque cas d'expérience, les mesures individuelles avec leur erreur probable, en fonction du temps, la bande horizontale est la moyenne générale, non corrigée des gerbes ni de l'effet barométrique, avec son erreur probable.

Les fractions indiquent dans chaque cas la proportion du nombre des

mesures ayant une partie commune avec la moyenne générale, par rapport au nombre total de ces mesures partielles.

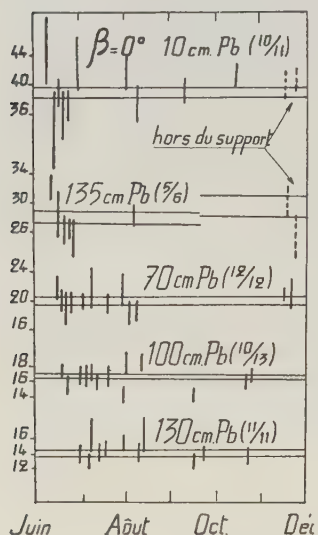


FIG. 10. — Contrôle de la stabilité des mesures en fonction du temps.

par deux voltmètres branchés en permanence, un voltmètre électrostatique indiquant la tension appliquée aux compteurs, un voltmètre à cadre mobile indiquant la valeur de la polarisation négative appliquée à la lampe « mélangeuse » sélectionnant les coïncidences. L'écart maximum constaté a été de 25 volts pour la haute tension et de 1,5 volt pour la polarisation. L'examen des courbes figures 11 a et 11 b (1) prouve que ces variations n'entraînent pas d'erreur systématique supérieure à 0,5 o/o

Celles-ci n'ayant pas été corrigées de l'effet barométrique un certain nombre des écarts observés est dû à cette cause. En particulier les premières mesures des points 10 et 35 cm de Pb nettement supérieures aux moyennes générales correspondent aux pressions respectives particulièrement basses de 742 et 746 mm de mercure.

Aucune dérive de l'appareil n'est décelable. Signalons à ce propos qu'à près d'un an d'intervalle au cours des mesures de diffusion qui seront exposées chapitre V, une nouvelle série de mesures  $\beta = 0^\circ$ , 35 cm de plomb ayant été entreprise a donné à 1 o/o près la même valeur, soit un écart trois fois plus petit que les erreurs probables.

La stabilité du sélecteur a été contrôlée

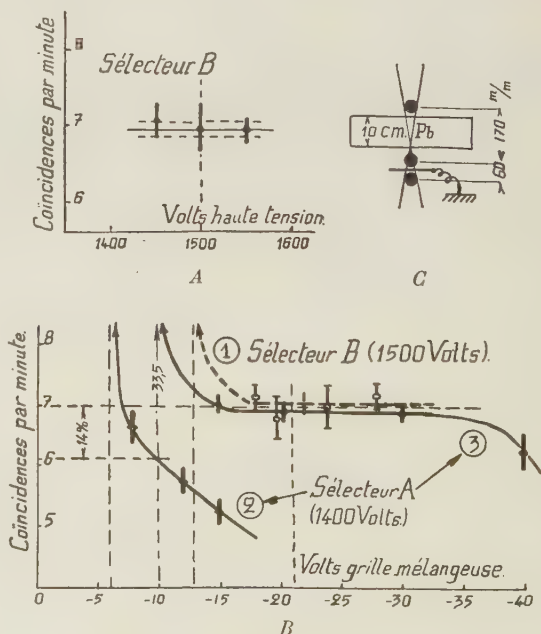


FIG. 11. — Contrôle de la stabilité des mesures en fonction des tensions de l'appareil, en c disposition des compteurs employés.

sur les mesures individuelles au cas le plus défavorable où cet écart aurait persisté pendant toute la durée de cette mesure.

L'appareil ayant une marche continue il importe de s'assurer qu'il n'y a pas eu d'interruption de courant tandis qu'il fonctionne sans surveillance. Après s'être assuré qu'il reprend un mode de fonctionnement normal après une interruption de courant on a monté sur la phase du secteur alimentant l'appareil un indicateur de pannes qui en inscrit automatiquement la durée sur le tambour du baromètre enregistreur, en cas de doute sur la durée exacte de l'interruption de courant la mesure correspondante a été éliminée.

*b) CAUSES D'ERREURS DIVERSES. — Erreur sur l'angle d'inclinaison.*

— La répartition angulaire du rayonnement étant de la forme  $N = A \cos^2 \theta$  il s'ensuit une erreur relative :

$$\Delta N/N = 2 \operatorname{tg} \theta \Delta \theta ;$$

$\theta$  est mesuré au moyen d'un rapporteur à niveau à bulle au quart de degré près, par suite de la répétition des mesures,  $\theta$  moyen est correct à 0,1° près. La mesure à 75° n'étant utilisée qu'à titre d'indication, le cas le plus défavorable est celui où  $\theta = 54^{\circ}30'$  pour lequel on a :  $\Delta N/N = 0,50/0$  faible vis-à-vis de l'erreur statistique probable qui est égale dans ce cas à 2 0/0 (voir mesure 14, tableau V).

Les angles n'ont pas été définis avec cette précision dans les mesures en altitude mais les erreurs dues à ce fait restent faibles vis-à-vis des erreurs statistiques probables qui sont dans ce cas également plus grandes (7 0/0 dans le cas de la mesure 11, tableau III,  $\alpha = 64^{\circ}14'$  cm Pb).

*Angle solide fini.* — L'angle solide défini par les compteurs n'est pas infiniment petit, les rayons mesurés ne font pas tous l'angle  $\theta$  avec la verticale. L'angle d'ouverture de l'appareil est de  $\pm 14^{\circ}30'$  dans le plan des compteurs et  $1^{\circ}30'$  dans la direction perpendiculaire.

Il en résulte un facteur de correction que l'on peut calculer en supposant là encore une répartition angulaire en  $A \cos^2 \theta$ , qui ne commence à devenir appréciable que pour les angles  $\theta$  voisins de 90°. Comme le résultat expérimental est un rapport de deux mesures, cette correction est nulle dans le cas d'angles  $\theta$  égaux aux deux stations (mesures en direction verticale par exemple).

*Rendement de l'appareil et des compteurs.* — Celui du sélecteur est pratiquement égal à 1, celui des compteurs voisin de 99 0/0 en coïncidences triples la perte de comptage, voisine de 3 0/0 est négligeable puisqu'elle affecte de la même façon les deux termes du rapport expérimental.

*c) NIVEAU RELATIF DES MESURES AUX DEUX STATIONS.* — Elles ont été faites à près de deux ans d'intervalle avec des sélecteurs différents. La figure 12 représente, en fonction de l'épaisseur de l'écran le logarithme décimal du nombre des coïncidences par 100 minutes obtenues, au niveau de la mer, pour  $\beta = 0$  et 44° en juillet 1939 avec l'appareil ayant servi en

altitude (sélecteur A) (mesures 1 à 9, tableau IV), et pour  $\beta = 0$  et  $43^{\circ}15'$  en 1941 (sélecteur B) (mesures 1 à 6, 11 à 13, tableau V).

En tenant compte d'un facteur égal à 2,5 0/0 dû au fait que l'angle était égal à  $44^{\circ}$  pour les premières mesures, au lieu de  $43^{\circ}15'$  dans les secondes, il reste un facteur moyen de l'ordre de 10 0/0 en faveur des mesures faites en 1941.

Cette différence est attribuable aux chocs retardés dans les compteurs, phénomène dont on a constaté l'existence entre les deux séries d'expériences :

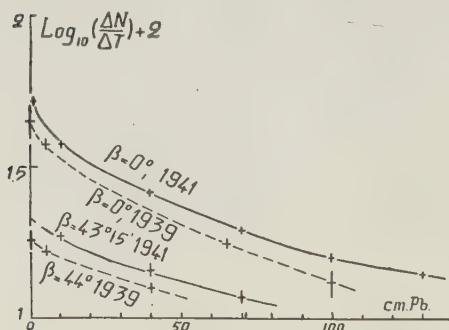


FIG. 12. — Comparaison des mesures.  
TABLEAUX IV et V.

Les électrons produits dans les compteurs par une particule cosmique sont en petit nombre, souvent un seul, il arrive que le déclenchement dans le compteur du phénomène d'avalanche électronique se trouve retardé par la capture de cet électron par un atome du gaz contenu dans le compteur, passant dans un état excité

métastable. Le retard moyen ainsi produit dans le déclenchement du compteur n'est pas négligeable vis-à-vis du temps de résolution du sélecteur, qui est de l'ordre de  $10^{-6}$  seconde, il y a donc perte de comptage.

Il suffit de diminuer de moitié le pouvoir de résolution du sélecteur (ce qui a été fait dans le cas du sélecteur B), en augmentant la constante de temps du circuit grille des lampes de Rossi au moyen d'une capacité de 50 cm branchée entre grille et masse, pour compter tous les chocs, à moins de 0,5 0/0 près. On s'est assuré de ce fait en procédant à une comparaison directe des deux sélecteurs : les trois compteurs étant disposés suivant le schéma *c* figure 11, la courbe (2) représente le nombre des coïncidences observées en fonction de la polarisation de la grille de la lampe mélangeuse, avec le sélecteur A utilisé dans les mêmes conditions qu'en 1939, c'est-à-dire sans capacités sur les grilles des lampes de Rossi et 1 400 volts appliqués aux compteurs, la courbe (1) figure 11 donne les résultats correspondants avec le sélecteur B utilisé dans les mêmes conditions qu'en 1941 c'est-à-dire avec des capacités de 50 cm sur les grilles des lampes de Rossi et 1 500 volts appliqués aux compteurs. On voit sur la figure que, pour la valeur de la polarisation adoptée lors des mesures de 1939 la perte de coïncidences est de l'ordre de 14 0/0.

En tenant compte du facteur de correction de 10 0/0 obtenu plus haut par comparaison directe des courbes de la figure 12 on peut finalement admettre un facteur de correction de + 12 0/0.

La courbe (3) est obtenue avec le sélecteur A, après introduction des capacités de 50 cm sur les grilles des lampes de Rossi, on voit qu'elle ne diffère plus que de 1 0/0 de la courbe (1) autant que l'on puisse en juger

étant donné les erreurs probables, cet écart doit être dû à la différence des tensions appliquées aux compteurs dans les deux cas (1 400 volts pour (3) 1 500 volts pour (1).

D'autre part le fait que le rendement du sélecteur cesse alors dans de grandes limites de dépendre de la tension de grille de la lampe mélangeuse a été expliqué par Maze (*Thèse de Doctorat*, Paris, 1941, pages 61-65).

Un autre procédé de comparaison des niveaux des mesures aux deux stations a été employé : il résulte de mesures effectuées verticalement avec un écran de 12,7 cm de plomb, par Rossi, Hilberry et Hoag (70) à diverses altitudes, conduisant à un rapport de 1,98 entre les intensités de rayonnement pour les deux points  $\theta = 0^\circ$  6,82 m H<sub>2</sub>O et  $\theta = 0^\circ$  10,24 m H<sub>2</sub>O. Ce résultat est en bon accord avec nos estimations (voir figure 13).

d) MESURE DE LA DENSITÉ DE L'ÉCRAN. — Quatre des briques de plomb constituant les écrans ont été prises au hasard, leur densité  $\rho$  mesurée par la méthode du vase à déversement a été trouvée égale à :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Brique n}^\circ 1 \quad \rho = 11,38 \pm 0,01 \\ \text{Brique n}^\circ 2 \quad \rho = 11,39 \pm 0,01 \\ \text{Brique n}^\circ 3 \quad \rho = 11,37 \pm 0,01 \\ \text{Brique n}^\circ 4 \quad \rho = 11,39 \pm 0,01 \end{array} \right\} \text{d'où } \rho = 11,4$$

Cette valeur a été utilisée dans le calcul de la formule de Bloch chap. II, § 3.

5° **Résumé des résultats expérimentaux.** — Ils sont résumés par la figure 13 où les valeurs des colonnes 8 tableau III et 10 tableau V sont portées avec leur erreur statistique probable, en fonction de l'épaisseur  $x$  de l'écran. Chaque courbe correspond à une valeur constante de l'angle, celles en traits pleins sont relatives à la station B (niveau de la mer), celles en traits mixtes, à la station A (altitude).

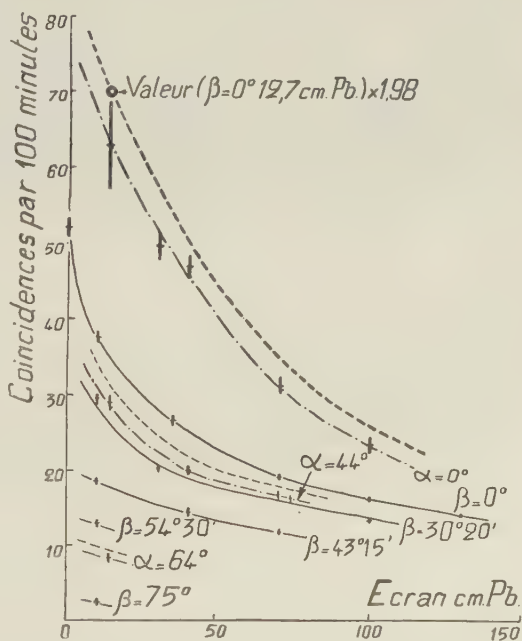


FIG. 13. — Ensemble des résultats expérimentaux, stations A et B.

On a figuré en pointillé les résultats relatifs à la station A multipliés

par le facteur 1,12 déduit du paragraphe 4. Le point ● correspond à l'intensité verticale en B pour 12,7 cm de plomb multipliée par le facteur 1,98 déduit des expériences de Rossi.

Les deux courbes d'absorption  $N = f(x \text{ cm Pb})$  pour  $\alpha$  et  $\beta = 0$ ,  $N_A$  et  $N_B$ , sont représentées à moins de 1 o/o près par les formules empiriques suivantes :

$$N_A = 1000 / (12,66 + 0,021 x^{1,258}) \quad [25]$$

$$N_B = 1000 / (21,277 + 0,775 x^{0,8602}) \quad [26]$$

## V. — PREMIERS RÉSULTATS

**1° Spectres d'absorption et d'énergie du rayonnement aux deux stations.** — Au moyen de la formule [7], chapitre II et des courbes  $N = f(x \text{ cm Pb})$ , 0 cst. de la figure 13 on peut déduire les spectres d'absorption :  $N = \varphi(E_{10^8 \text{ eV}})$ , 0 cst. A partir de ceux-ci on obtient les spectres d'énergie par la formule :

$$S(E) = \frac{\partial}{\partial E} \varphi(E).$$

Il est plus simple de procéder de la façon suivante :  $E_{\text{minimum}}$  étant calculé par la formule [7] pour les différentes valeurs des écrans utilisés. On trace les courbes  $\log_{10} N$  en fonction de  $\log_{10} E$ . C'est ce qui a été fait figure 14 pour les deux courbes  $N_A = \varphi_A(E)$  et  $N_B = \varphi_B(E)$  en direction verticale, correspondant aux deux stations A et B (courbes *a* et *b*) par suite de l'existence du groupe Mou du rayonnement (18 o/o du rayonnement total au niveau de la mer, d'après des mesures antérieures à ce travail) la courbe *a* n'a pas été tracée à partir du point expérimental  $x = 0$  ( $E = 10^8 \text{ eV}$ ), mais, à partir d'un point situé 18 o/o plus bas, il en serait de même en altitude où le groupe Mou a une importance relative de 50 o/o (le point  $x = 0$  en altitude n'a pas été mesuré).

On voit sur la figure que les deux courbes *a* et *b* sont sensiblement rectilignes à partir de  $E \geq 6,32 \cdot 10^8 \text{ eV}$  ( $x = 40 \text{ cm Pb}$ ). On en déduit que les spectres d'absorption sont de la forme :

$$N_A = k_a E^{-0,79} \text{ et } N_B = k_b E^{-0,57}$$

les spectres d'énergie sont donc respectivement de la forme :

$$S_A = k'_a E^{-1,79} \text{ et } S_B = k'_b E^{-1,57}$$

où  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k'_a$ ,  $k'_b$  sont des constantes.

**2° Vie moyenne du Méson déduite des spectres du rayonnement vertical.** — Comme nous l'avons vu chapitre III, § 4, les résultats précédents doivent pouvoir nous permettre d'évaluer, de plusieurs manières

différentes, le rapport  $\tau_0/\mu_0$ , indépendamment de toute hypothèse quant à la hauteur de formation du rayonnement :

a) SANS HYPOTHÈSES SUR LA FORME DU SPECTRE D'ÉNERGIE INITIAL. —

1) Considérons la bande d'énergie déterminée à la station B par les écrans  $x = 14$  et  $x = 70$  cm, la quantité d'air traversée verticalement de A à B, égale à  $3,42$  m  $H_2O$  équivalents, présente une absorption équivalente à celle de  $3,42 \times 14,3 = 44$  cm de plomb (voir Chap. II, § 4). Les écrans correspondant à la même absorption totale en A sont donc :  $x = 14 + 44 = 58$  cm de plomb et  $x = 70 + 44 = 114$  cm de plomb.

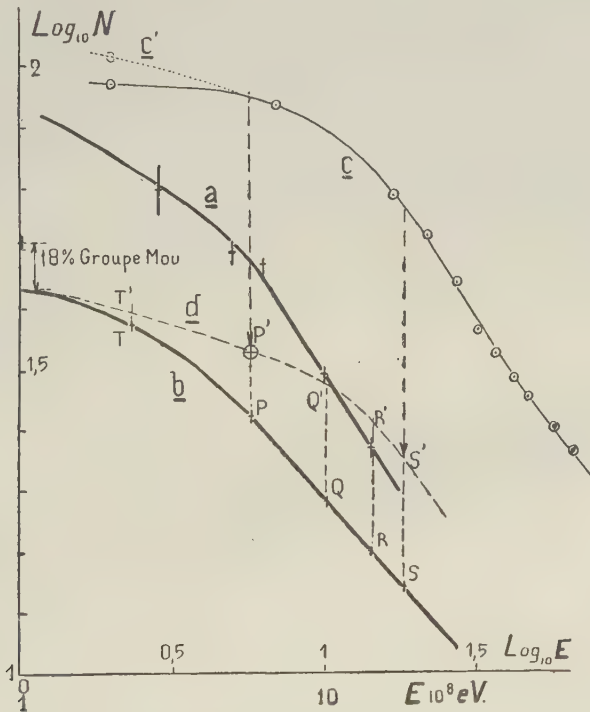


FIG. 14. — Logarithme du nombre, en direction verticale, des rayons d'énergie supérieure à  $E$  en fonction de  $E$  courbe  $a$ , station A, courbe  $b$ , station B.

Le rapport expérimental, donnant la proportion du rayonnement désintégré entre A et B, sera donc :

$$\rho = (N_{B14} - N_{B70}) / (N_{A58} - N_{A114}) \quad [27]$$

$N_A$  et  $N_B$  étant les deux courbes  $N = f(x)$  en A pour  $\alpha = 0$ , en B pour  $\beta = 0$  de la figure 13 on trouve ainsi  $\rho = 0,9$ .

L'énergie moyenne (\*) en A est  $\bar{E}_A = 12,64$ , celle en B,  $\bar{E}_B = 5,8$ , l'énergie moyenne le long du trajet  $\bar{E}_{AB} = 8,8$ . Ces énergies étant exprimées en unités  $\delta$  (voir Chap. II, § 3). La longueur  $l$  du trajet  $AB = 3,4$  km si  $L$  est le parcours moyen du rayonnement :  $\rho = \exp(-l/\bar{L})$  en remplaçant  $\bar{L}$  par sa valeur tirée de la formule [8] on trouve finalement :

$$\tau_0 = \frac{l}{c} \times \frac{\mu_0 c^2}{\bar{E}_{AB}} \times \frac{1}{\log_e \rho} \quad [28] (**)$$

formule où toutes les quantités sont connues sauf  $\mu_0 c^2$  pour lequel on admettra la valeur  $10^8$  eV ( $\mu_0 \approx 200$ ), on obtient ainsi pour  $\tau_0$  une valeur beaucoup trop forte de l'ordre de 10 à 15  $\mu$ Sec.

2) On peut aussi considérer le spectre d'énergie en B ou en A et en déduire, pour différentes valeurs de  $\tau_0$  le spectre correspondant A ou en B. Cette méthode a donné également des valeurs de  $\tau_0$  beaucoup trop fortes.

b) Si l'on admet que le spectre d'énergie initial des mésons est de la forme :  $S_F(E) = S_{0F} E^{-\gamma}$  avec  $\gamma$  compris entre 2 et 3 (\*\*\*) on peut calculer le spectre d'absorption  $N_B(E)$  en B et le comparer à la courbe expérimentale. On a en effet :

$$N_B(E) = \int_E^\infty S_B(E) = \int_{E+\varepsilon_1 H_B - fh_0}^\infty S_F(E) \left( \frac{fh_0}{hb} \frac{E_b}{E} \right)^{\frac{\mu_0 c^2 K}{E + \varepsilon f h_0}} dE.$$

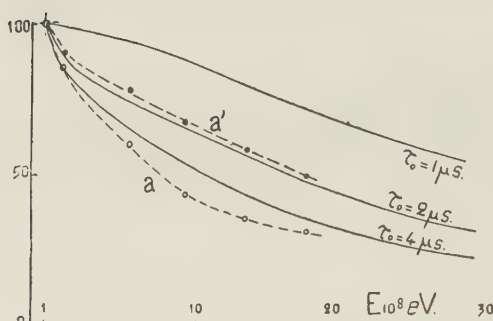


FIG. 15. — Comparaison des courbes d'absorption expérimentales et calculées en a, courbe expérimentale, en a', courbe expérimentale corrigée de l'effet de diffusion (station B).

Le résultat du calcul, effectué pour  $\gamma = 2,75$ ,  $fh_0 = 2$  m  $H_2O$  soit  $X_F = 13,5$  km  $\tau_0 = 1, 2, 4$   $\mu$ S. est donné fig. 15, la courbe expérimentale (a) correspond à  $\tau_0 \gg 4$   $\mu$ S.

Inversement, le calcul du spectre  $S_F(E)$  à partir du spectre  $S_B(E)$  déduit de la courbe expérimentale (a) conduit pour  $\gamma$  à la valeur 6 au lieu de celle de 2 à 3 attendue.

(\*) L'énergie moyenne d'une bande d'énergie comprise entre les limites  $E_1$  et  $E_2$  est calculée par la formule :  $\bar{E} = (E_2 - E_1) / \log(E_2/E_1)$ .

(\*\*) L'emploi de cette formule approchée déduite des formules [8] et [19] est justifié par le fait qu'il ne s'agit ici que de contrôler si  $\tau_0$  est bien de l'ordre de grandeur attendu. On a vérifié que l'emploi de la formule [19] complète donnait un résultat analogue.

(\*\*\*) La forme du spectre primaire et la valeur de  $\gamma$  adoptées ici sont celles admises par les différents auteurs, d'après les considérations générales sur l'ensemble du rayonnement, en particulier sur le phénomène des grandes gerbes (119).

Le spectre d'énergie en A conduit à des résultats identiques. Le spectre d'absorption B a alors été comparé à ceux obtenus par d'autres auteurs (fig. 16). Le premier en date parmi ceux d'une précision suffisante est celui de Street, Woodward et Stevenson (97) (courbe *b*), d'autres sont dus à Clay et à ses collaborateurs (65) (98) (courbes *d* et *e*).

Notre courbe, figurée en *a*, est voisine de celle de Street, mais diffère notablement de celles de Clay, lesquelles diffèrent également entre elles. Examinons la cause d'une telle divergence.

Remarquons que l'angle d'ouverture utilisé dans nos mesures :  $1^{\circ}30' \times 14^{\circ}30'$ , est petit à côté de ceux employés par Clay :  $16^{\circ} \times 36^{\circ}$  pour la courbe *d* et  $30^{\circ} \times 38^{\circ}$  pour la courbe *e*, tandis qu'il est très voisin de celui de Street :  $2^{\circ} \times 10^{\circ}30'$ .

Les différentes courbes s'échelonnent donc dans l'ordre de ces angles d'ouverture.

En tenant compte de la forme de la courbe de répartition angulaire du rayonnement, et de son durcissement avec l'augmentation de l'angle  $\theta$  on peut montrer néanmoins que l'effet observé est hors de proportion avec celui que l'on peut ainsi calculer. Ce n'est donc pas la cause directe des écarts observés.

**3° Effet de diffusion dans les écrans.** — La courbe *c* figure 16 a été obtenue avec la même disposition des compteurs que dans les autres mesures, donc avec le même angle solide, mais au moyen d'écrans plus larges, 10 cm au lieu de 5 (voir fig. 17).

Malgré la précision réduite de ces mesures, due à leur brièveté, auxquelles a été jointe la mesure 19 du tableau V prise dans les mêmes conditions (écran large), on peut voir que la courbe *c* se détache nettement de *a* et se place entre *b* et *d*.

Ce fait doit être attribué au changement de largeur de l'écran, c'est-à-dire à un effet de diffusion dans celui-ci, les rayons diffusés ayant traversé les deux premiers compteurs et s'échappant latéralement de l'écran étroit ne sont pas comptés par le troisième compteur, tandis qu'une partie de ceux-ci peut

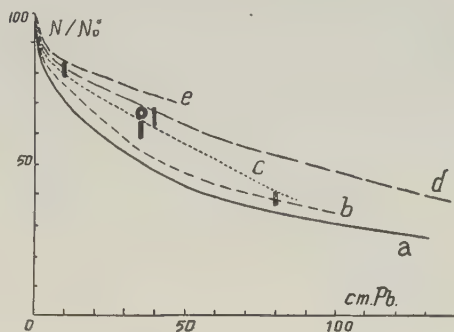


FIG. 16. — Comparaison de la courbe d'absorption expérimentale en direction verticale (courbe *a*), avec celles de Street (courbe *b*) et de Clay (courbes *d* et *e*).

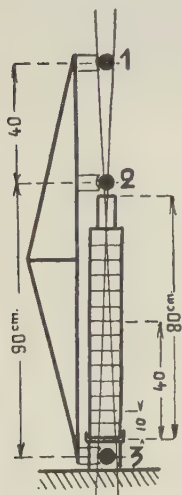


Fig. 17. — Disposition employée pour la courbe d'absorption *c* figure 16 (écran large).

se trouver ramenée dans la direction initiale par une nouvelle diffusion dans le cas d'un écran large.

Des expériences systématiques ont été alors entreprises, 10 cm de plomb ont été placés en permanence sur le compteur inférieur afin d'éviter en première approximation les corrections dues aux variations du nombre des gerbes. Un écran supplémentaire de largeur normale (5 cm) et de 25 cm d'épaisseur a été placé successivement aux trois positions ABC, de plus un écran de même épaisseur mais de 10 cm de largeur, afin de couvrir tout l'angle solide des compteurs a été placé en D dans une quatrième expérience (voir fig. 18).

Si un effet de diffusion existe il est à prévoir qu'il sera plus important en B qu'en A par suite de la diminution de l'angle solide sous lequel le compteur inférieur voit l'écran, en C se produira une compensation entre la diminution due à la distance écran-compteur 3 et l'augmentation due au fait qu'il n'y a plus qu'un compteur au-dessus du plomb (augmentation par suite de la diffusion de l'angle d'ouverture utile du système), enfin en D une augmentation due à la suppression de la perte par diffusion dans l'écran supplémentaire.

Les résultats expérimentaux portés en face de chacune des positions successives A.B.C.D. de l'écran confirment ces prévisions. On voit de plus que cet effet est important.

La formule de Wilson (90) et les expériences récentes de Code (91) signalées Chapitre III, § 2 permettent d'évaluer celui-ci, mais on est conduit à des calculs compliqués par le fait que la surface effi-

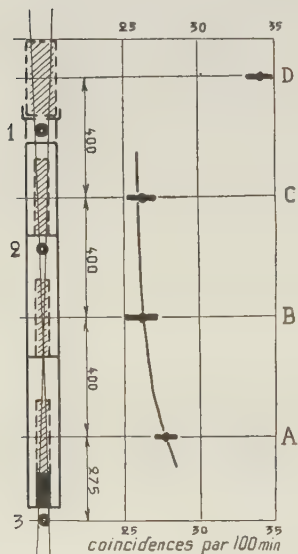


FIG. 18. — Etude de la diffusion dans les écrans.

cace de l'appareil varie avec l'angle d'incidence du rayonnement, de plus il faudrait connaître l'énergie moyenne totale du rayonnement dépendant du spectre hypothétique de celui-ci pour les grandes énergies.

Nous avons donc procédé d'une autre façon :

On possède une bonne statistique d'énergie du rayonnement pénétrant au niveau de la mer, due à Haydn Jones (72) (\*). On peut en déduire la courbe :

$$\log_{10} N_c = f(\log_{10} E_0) \quad \text{ou} \quad N_c(E_0) = \int_{E_0}^{\infty} S(E) dE$$

celle-ci a été tracée en c, figure 14.

(\*) Celle-ci a été obtenue au moyen de la chambre de Wilson dans le champ magnétique dans les conditions expérimentales telles que l'on se trouve à l'abri de l'effet de diffusion.

En remarquant que la limite inférieure du premier intervalle d'énergie considéré par Haydn Jones  $2.10^8$  eV. correspond à  $x = 7,5$  cm de plomb alors que l'écran interposé dans ses expériences (11,47 cm de plomb) correspond à une énergie minimum de  $2,53.10^8$  eV. le premier point de la courbe  $c$  est certainement trop bas, il a été relevé de 11 0/0, correction déduite de notre courbe d'absorption ( $\beta = 0$ ,  $N_B = f(x)$ , figure 13), d'où la courbe  $c'$  figure 14.

(Cette manière de procéder est légitimée par le fait que la correction de notre courbe due à la diffusion est faible pour les premiers centimètres de plomb, quelques centièmes, ainsi qu'on va le voir).

Soit  $\sigma_{10}$  le coefficient de correction dû à la diffusion dans les 10 premiers centimètres de plomb de l'expérience (fig. 18). D'après les résultats indiqués sur cette même figure l'effet dû aux 25 cm de plomb supplémentaires donne un facteur de correction égal à 1,24, en admettant provisoirement pour  $\sigma_{10}$  une valeur égale à 1,05,  $1,05 \times 1,24 = 1,30$  représente le facteur de correction dû à la diffusion dans les 35 cm de plomb.

Le point  $P'$  figure 14 représente le point  $P$  ( $\beta = 0^\circ$ , 35 cm Pb) ainsi corrigé. Si l'on translate la courbe  $cc'$  de manière à la faire coïncider avec  $P'$  on obtient la courbe  $d$ , les longueurs  $PP'$ ,  $QQ'$ ,  $RR'$ ,  $SS'$ ..., représentent alors directement les logarithmes des facteurs de correction des points expérimentaux, en particulier pour  $TT'$  qui correspond au point  $x = 10$  cm, on a :  $\log \sigma_{10} = 0,02$  d'où :  $\sigma_{10} = 1,048$  pratiquement égal à la valeur admise au début 1,05.

**4° Vie moyenne  $\tau_0$  déduite des spectres corrigés de l'effet de diffusion.** — La courbe  $a'$  figure 15 est le spectre d'absorption expérimental après correction de diffusion on voit que sa comparaison avec les spectres calculés pour  $fh_0 = 2$  m  $H_2O$  et  $\gamma = 2,75$  (voir § 2, b) conduit à une valeur de  $\tau_0$  de l'ordre de 1,8 à 1,9  $\mu S$  (\*).

La méthode, indépendante de la hauteur de formation des mésons et de leur spectre initial, employée au paragraphe 2,  $a_1$ , conduit de même après ces corrections à la valeur  $1,5 \mu S \pm 0,4$ .

Etant donné l'importance de la correction effectuée, ces valeurs de la vie moyenne, calculées pour  $\mu_0 c^2 = 10^8$  eV soit  $\mu_0 \approx 200 m_0$  ne peuvent être considérées en toute rigueur comme une mesure de  $\tau_0$  mais plutôt comme une justification de la correction elle-même, les valeurs ainsi trouvées étant en très bon accord avec les mesures directes indiquées Chapitre II, § 2 c.

(\*) Le calcul effectué avec une valeur de  $fh_0$  plus grande de l'ordre de 3 m  $H_2O$   $X_F = 10$  km, conformément aux conclusions de ce travail conduit à  $\tau_0$  de l'ordre de 1,5  $\mu S$  au lieu de 1,8 à 1,9, c'est-à-dire comparable à celle de la deuxième méthode et aux mesures directes.

## VI. — HAUTEUR DE FORMATION DU MÉSON

1° *Les courbes de répartition angulaires du rayonnement.* — Le réseau des courbes  $N = f(x)$ ,  $\theta = \text{cst.}$  de la figure 13 ainsi que les premiers résultats obtenus (voir chap. I<sup>er</sup>, fig. 1 et 3 et tableau I) nous permettent de tracer le réseau des courbes de répartition angulaires  $N = f(\theta)$  pour  $x = \text{cst.}$  Nous tracerons en fait les courbes  $\log_{10} N = f(\sec \theta)$  beaucoup plus intéressantes à considérer.

Remarquons que la forme de ces courbes n'est pas, en première approximation, affectée par le phénomène de diffusion puisque pour chacune

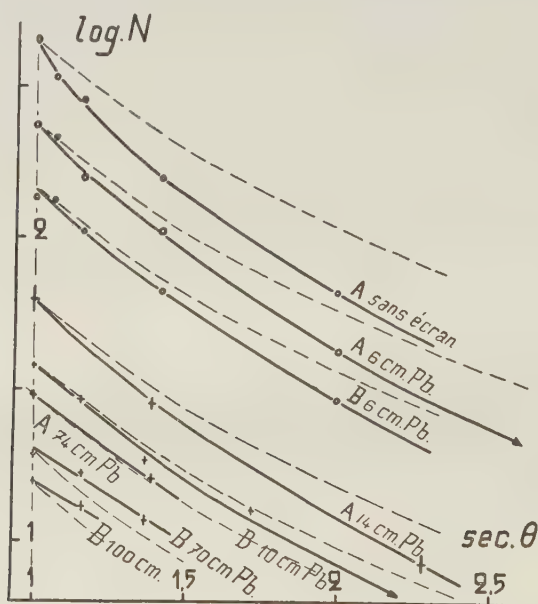


FIG. 19. — Répartition angulaire du rayonnement. En traits pleins courbes expérimentales, en pointillé formule empirique  $N = N_0 (\sec \theta)^{-2}$ .

d'elles on a  $x = \text{cst.}$  donc  $\sigma_x$  cst., il n'affecte que leur position relative (ceci n'est pas rigoureusement exact, car l'énergie moyenne du rayonnement augmentant avec l'angle,  $\sigma_x$  doit légèrement diminuer pour les grandes valeurs de  $\theta$ , mais ceci ayant lieu pour toutes les courbes ne change pas leur forme relative, donc les conclusions qui vont suivre).

On a remarqué depuis longtemps (28) (99) (69) que la forme de ces courbes était indépendante de  $x$  et de  $h$ , pression au point d'observation et qu'elle était voisine de la courbe empirique :  $N = N_0 (\sec \theta)^{-2}$ .

Bruins (73) dans l'hypothèse d'une hauteur de formation constante a établi que l'on devait avoir :  $N = N_0 (\sec \theta)^{-(\gamma-1)}$ ,  $\gamma$  étant l'exposant de

l'énergie dans le spectre initial du rayonnement, comme celui-ci est voisin de 3 on retrouve bien la distribution empirique en  $(\sec \theta)^{-2}$ . Nos résultats résumés figure 19 permettent d'établir que ce n'est qu'une approximation, provenant sans doute de l'hypothèse d'une hauteur de formation constante.

On constate que les courbes expérimentales à l'une quelconque des deux stations d'observation s'écartent systématiquement des courbes pointillées  $\log N = \log N_0 - 2 \log \sec \theta$  figurées dans chaque cas, et représentant la répartition  $N = N_0 (\sec \theta)^{-2}$ .

Elles coïncident avec les formules empiriques  $\log N_i = \log N_{0_i} - \lambda_i \log \sec \theta$  où  $\lambda_i$  voisin de 2 diminue systématiquement quand  $x$  ou  $h$  augmentent. On trouvera figure 19 bis les valeurs de  $\lambda_i$  aux deux stations en fonction de  $x$ .

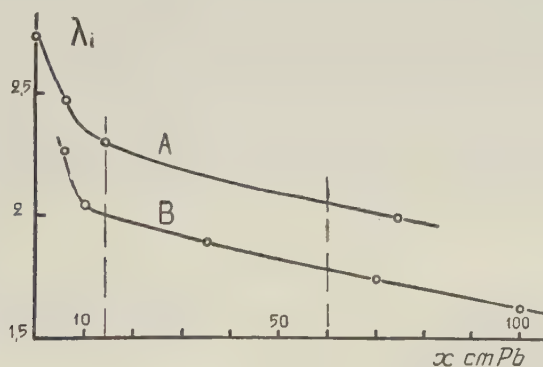


FIG. 19 bis. — Coefficient  $\lambda$  de la formule empirique  $N = N_0 (\sec \theta)^{-\lambda}$  de la répartition angulaire du rayonnement déduit des courbes expérimentales figure 19.

On voit que  $\lambda_i$  décroît très vite pour les premiers centimètres de plomb puis ensuite beaucoup plus lentement, ce fait doit être attribué à la partie molle du rayonnement dont la répartition angulaire est plus serrée autour de la verticale, et sans doute également à la décroissance rapide des mésons de faible énergie quand le trajet augmente par suite de l'inclinaison de l'appareil par rapport à la verticale.

**2° Rapports d'atténuation déduits des courbes de répartition angulaires.** — En vue de l'application de la méthode des CONDITIONS CORRESPONDANTES décrite chapitre III, § 5, il faut connaître le rapport des intensités du rayonnement aux deux points A et B sous des angles  $\alpha$  et  $\beta$  tels que  $h_a \sec \alpha = h_b \sec \beta$  pour des rayons monocinétiques, ou compris dans une bande étroite d'énergie, le logarithme de ce rapport figurant au premier membre de l'équation [24] (chap. III, § 5).

Ainsi qu'on peut le voir d'après les courbes d'absorption figure 13 ou

mieux d'après les courbes figure 19 *bis*, un écran minimum  $x_1$  d'environ 14 cm est nécessaire pour arrêter tout le rayonnement mou. Le deuxième écran  $x_2$  doit avoir une valeur assez grande pour que les différences  $N_{x_1} - N_{x_2}$  soient grandes vis-à-vis des erreurs probables de mesures.

On est limité dans le choix de  $x_2$  pour les valeurs expérimentales, d'autre part la bande d'énergie considérée ne doit pas être trop large si l'on veut pouvoir appliquer à sa valeur moyenne la formule [24] valable pour des rayons monocinétiques.

Pour ces raisons nous avons choisi  $x_2 = 60$  cm de plomb. On déduira donc des résultats expérimentaux le rapport :

$$\rho = (N_{A14} - N_{A60}) / (N_{B14} - N_{B60}) \quad (*) \quad [29]$$

pour des angles en A et en B donnés par la relation de correspondance  $h \sec \alpha = h \sec \beta$ ,  $\beta = h \sec \theta$ , en particulier pour  $h \sec \theta = 10,24$  m H<sub>2</sub>O,  $\beta = 0^\circ$ ,  $\alpha = 48^\circ 10'$  (voir chap. III, § 6).

L'énergie moyenne du rayonnement considéré, le long de son trajet, augmentant avec l'angle, en prenant des rapports  $\rho$  correspondant à des valeurs croissantes de  $h \sec \theta$  on obtiendra  $\tau_0$  en fonction de cette énergie moyenne.

En plus du rapport  $\rho$ , correspondant à  $h \sec \theta = 10,24$  nous considérerons les quatre autres rapports  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho_4$  et  $\rho_5$  déduits de nos résultats pour les valeurs de  $h \sec \theta = 11,5$ ,  $12,75$ ,  $14,05$  et  $15,26$  m H<sub>2</sub>O divisant en intervalles égaux le champ de nos mesures.

Pour les obtenir il suffit en principe de tracer les courbes donnant  $N_{A14}$  et  $N_{A60}$  en fonction de  $\alpha$  (ou de  $\sec \alpha$ ),  $N_{B14}$  et  $N_{B60}$  en fonction de  $\beta$  (ou de  $\sec \beta$ ). Mais ces courbes étant des fonctions décroissantes de l'angle, les différences  $N_{A14} - N_{A60}$  et  $N_{B14} - N_{B60}$  arrivent pour  $\rho_5$  à devenir de l'ordre des erreurs probables.

Nous connaissons d'après le paragraphe précédent la forme de ces courbes c'est-à-dire les exposants  $\lambda_i$  déduits des résultats figure 19 *bis*. On trouve ainsi :

$$\lambda_{A14} = 2,3 \quad \lambda_{A60} = 2,07 \quad \lambda_{B14} = 2 \quad \lambda_{B60} = 1,78$$

On a donc procédé de la façon suivante :

Le rapport  $\rho_1$  a été déduit des résultats expérimentaux corrigés de l'effet de diffusion.

Les rapports  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ,  $\rho_4$ ,  $\rho_5$  ont été déduits de celui-ci par la formule suivante dont l'établissement est facile :

$$\rho_i = \frac{N_{A14}^1 \left( \frac{\sec \alpha_1}{\sec \alpha_i} \right)^{\lambda_{A14}} - N_{A60}^1 \left( \frac{\sec \alpha_1}{\sec \alpha_i} \right)^{\lambda_{A60}}}{N_{B14}^1 \left( \frac{\sec \beta_1}{\sec \beta_i} \right)^{\lambda_{B14}} - N_{B60}^1 \left( \frac{\sec \beta_1}{\sec \beta_i} \right)^{\lambda_{B60}}} \quad [30]$$

formule dans laquelle  $i = 2, 3, 4$  ou  $5$ .

(\*)  $N_{A14}$  est le nombre de rayons enregistrés par unité de temps à travers un écran de 14 cm Pb, à la station A, de même  $N_{A60}$ ,  $N_{B14}$  et  $N_{B60}$ .

$N'_{A14}, N'_{A60}, N'_{B14}, N'_{B60}$  sont les valeurs déduites de l'expérience pour  $h \sec \theta_1 = 10,24$ , et où l'on a :

$$\frac{\sec \alpha_1}{\sec \alpha_i} = \frac{\sec \beta_1}{\sec \beta_i} = \frac{(h \sec \theta)_1}{(h \sec \theta)_i}.$$

On trouve finalement les résultats suivants :

|                                                   |                           |
|---------------------------------------------------|---------------------------|
| $(h \sec \theta)_1 = 10,24 \text{ m H}_2\text{O}$ | $\rho_1 = 0,514 \pm 0,1$  |
| $(h \sec \theta)_2 = 11,5 \text{ m H}_2\text{O}$  | $\rho_2 = 0,5 \pm 0,09$   |
| $(h \sec \theta)_3 = 12,75 \text{ m H}_2\text{O}$ | $\rho_3 = 0,456 \pm 0,08$ |
| $(h \sec \theta)_4 = 14,05 \text{ m H}_2\text{O}$ | $\rho_4 = 0,375 \pm 0,07$ |
| $(h \sec \theta)_5 = 15,26 \text{ m H}_2\text{O}$ | $\rho_5 = 0,296 \pm 0,06$ |

On voit donc que  $\rho = I_A/I_B$  DIMINUE quand l'énergie moyenne du rayonnement augmente, nous allons voir aux paragraphes suivants quelles conséquences on peut tirer de ce fait.

Une méthode analogue dont nous n'indiquons ici que les résultats a été appliquée au calcul des rapports  $\rho' = \frac{N_{A14}}{N_{B14}} (E \geq 2,86.10^8 \text{ eV})$

et  $\rho'' = \frac{N_{A60}}{N_{B60}} (E \geq 8,98.10^8 \text{ eV})$  donnant :

|                                                        |                           |                          |
|--------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| pour $(h \sec \theta)_1 = 10,33 \text{ m H}_2\text{O}$ | $\rho' = 0,74 \pm 0,04$   | $\rho'' = 0,78 \pm 0,04$ |
| pour $(h \sec \theta)_5 = 15,26 \text{ m H}_2\text{O}$ | $\rho' = 0,655 \pm 0,035$ | $\rho'' = 0,7 \pm 0,06$  |

Ces rapports diminuent également quand l'énergie augmente.

**3° Vie moyenne du Méson. Méthode des conditions correspondantes.** — La formule [24] (chap. III, § 5), en remplaçant l'énergie totale  $E_t$  et l'énergie à sa formation  $E_d$  du rayonnement en fonction de  $E_b$ , énergie à l'entrée de l'appareil en unités  $\mu_0 c^2 = 10^8 \text{ eV}$ , peut se mettre sous la forme :

$$\tau_0 \log_{10} \rho = \frac{(\sec \alpha - \sec \beta) K}{c \times (E_b + \varepsilon h \sec \theta)} \log_{10} \frac{h \sec \theta (E_b + \varepsilon h \sec \theta - \varepsilon f h_0)}{f h_0 E_b} \quad [24]'$$

Les limites de la bande d'énergie correspondant à  $x = 14$  et  $x = 60 \text{ cm Pb}$  sont respectivement, d'après la formule [7]  $E_{14} = 2,86$  et  $E_{60} = 8,98.10^8 \text{ eV}$ . Son énergie moyenne est donc  $\bar{E}_b = 5,35$  unités  $\mu_0 c^2$ .

En remplaçant (\*)  $E_b$  par  $\bar{E}_b$  dans la formule [24]' il vient après remplacement de  $c$  et de  $K$  par leurs valeurs  $3.10^5 \text{ km}$  et  $8,33 \text{ km}$ ;  $\varepsilon$  par 2 unités  $\mu_0 c^2/\text{m H}_2\text{O}$  :

$$[31] \left\{ \begin{aligned} &\tau_0 \log_{10} \rho \\ &= \frac{27,77 (\sec \alpha - \sec \beta)}{5,35 + 2h \sec \theta} \log_{10} \frac{h \sec \theta (5,35 + 2h \sec \theta - 2fh_0)}{5,35fh_0} 10^{-6} \text{ sec.} \end{aligned} \right.$$

(\*) On s'est assuré qu'on avait le droit de le faire en effectuant le calcul correct (intégration le long de la bande d'énergie) pour  $(h \sec \theta)_1 = 10,24 \text{ m H}_2\text{O}$  et  $fh_0 = 2 \text{ m H}_2\text{O}$ ; le résultat obtenu diffère de moins de 2 o/o de celui indiqué ici, écart négligeable vis-à-vis de l'erreur probable de  $\rho$ .

Le second membre de cette formule a été calculé en fonction de  $fh_0$  pour les différentes valeurs choisies pour  $h \sec \theta$  on obtient ainsi les

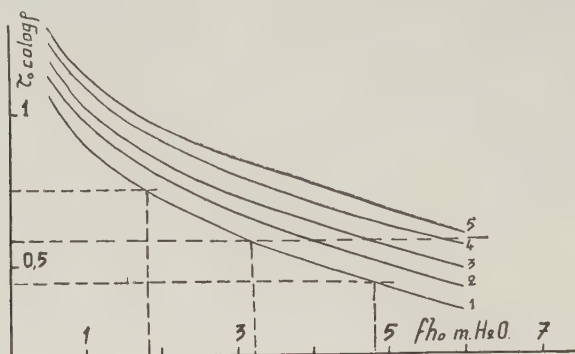


FIG. 20.

5 courbes de la figure 20, le nombre placé en regard de chacune d'elles indique les indices correspondants pour  $(h \sec \theta)_i$  et  $\rho_i$ .

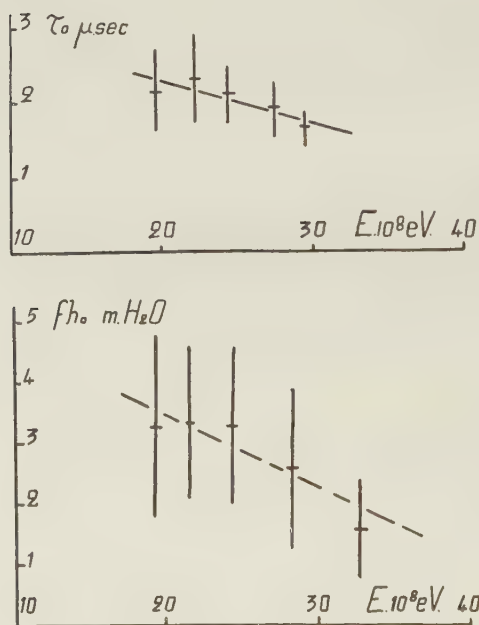


FIG. 21. — *a*, vie moyenne  $\tau_0$  du méson en fonction de l'énergie initiale calculée pour  $fh_0 = 3 \text{ m H}_2\text{O}$ ; *b*, hauteur moyenne de formation du méson en fonction de l'énergie initiale calculée pour  $\tau_0 = 2 \mu\text{S}$ .

A partir des valeurs de  $\text{colog}_{10} \rho$  déduites des résultats du paragraphe précédent on obtient finalement  $\tau_0$  en fonction de  $fh_0$  pour chaque valeur de  $h \sec \theta$ , c'est-à-dire en fonction de l'énergie moyenne du rayonnement au cours de son trajet

$$\bar{E} = (\bar{E}_d - \bar{E}_b) / \text{Log}_e (E_d / \bar{E}_b).$$

Les résultats obtenus en supposant  $fh_0$  constant, conformément à l'hypothèse faite jusqu'ici ont été résumés figure 21, *a*, dans le cas de  $fh_0 = 3 \text{ m H}_2\text{O}$ .

Autant que l'on puisse en juger, étant donné la grandeur des erreurs probables,  $\tau_0$  semble diminuer quand l'énergie moyenne du rayonnement augmente, en accord avec l'examen des résultats expérimentaux de Trumpy et Ubish (6g).

Des calculs ont été effectués d'autre part à partir des résultats expérimentaux  $\rho'$  et  $\rho''$  du paragraphe précédent au moyen de formules dérivées

des formules [21] [22] [23] du Chapitre III. Comme il n'y a pas dans ce cas de limite supérieure finie à la bande d'énergie, celles-ci et en particulier les énergies moyennes le long du trajet sont fortement affectées par les diverses hypothèses que l'on est obligé de faire sur le spectre initial du rayonnement mais les résultats obtenus indiquent là encore une diminution de  $\tau_0$  quand  $\bar{E}$  croît. Vu l'importance des erreurs probables les résultats obtenus, s'ils n'infirmement pas, ne permettent pas de conclure en faveur de l'hypothèse d'une masse variable pour la particule, en fonction de l'énergie, qui conduit à la conclusion inverse.

**4° Hauteur moyenne de formation des Mésons.** — Si l'on admet que  $\tau_0$  est constant en fonction de l'énergie, en accord avec les expériences récentes de Rossi et Hall (113) il faut en déduire que la hauteur moyenne de production du rayonnement varie avec son énergie, résultat conforme aux conclusions de Beardsley (114) à propos de l'étude de l'effet de température.

Les calculs du paragraphe précédent conduits en sens inverse à partir de  $\tau_0 = 2 \mu\text{Sec}$  donnent les résultats indiqués figure 21, *b*; là encore les erreurs probables sont grandes mais on peut voir que la hauteur moyenne de production du rayonnement augmente avec son énergie moyenne.

Le fait important c'est que cette altitude moyenne de production est notablement plus basse que celle admise jusqu'ici, elle est voisine de 3 m d'eau pour les mésons de  $210^9$  eV pour  $\tau_0 = 2 \mu\text{sec}$  et de 4 m pour  $\tau_0 = 1,5 \mu\text{sec}$ , valeur déduite des mesures directes du temps de désintégration. Le processus de formation des mésons à partir du rayonnement primaire est un phénomène qui semble donc se poursuivre à des altitudes beaucoup plus basses que celles envisagées jusqu'ici, ceci est en accord avec les expériences à la chambre de Wilson en haute altitude, de Herzog et Bostick (100) (101) (116) (117) et de Hugues (102) ainsi qu'avec les résultats de Veksler et Dobrotin (118) (\*).

**5° Critique des résultats obtenus.** — Ainsi que nous l'avons indiqué, la valeur quantitative des résultats obtenus est en fonction directe de celle admise pour la masse de la particule; si celle-ci est supérieure à 200 fois la masse de l'électron, voisine de 240 (51) par exemple les valeurs de  $\tau_0$  et  $f/h_0$  sont proportionnellement plus fortes que celles indiquées ici.

Diverses causes d'erreurs se sont introduites dans nos calculs :

— En particulier on a supposé la constance des coefficients de diffusion  $\sigma$  avec l'angle, si ceux-ci diminuent plus rapidement que nous l'avons estimé les rapports d'atténuation  $\rho$  doivent avoir des variations plus faibles que celles trouvées, il en serait par conséquent de même pour  $\tau_0$  et  $f/h_0$ .

— Nous avons admis d'autre part que le nombre des protons subsistant

(\*) La formation de mésons à des altitudes faibles est également confirmée par des résultats récents dus à Jean Daudin, non encore publiés.

dans le rayonnement à son entrée dans l'appareil était négligeable, celui-ci est voisin de 5 o/o du rayonnement total au niveau de la mer, on peut démontrer facilement, à partir des hypothèses initiales (chap. III, § 2), qu'il est en valeur absolue le même en deux points correspondants, la correction à effectuer est donc relativement plus forte en A qu'en B, il s'ensuit une diminution de  $\rho$  et par conséquent une augmentation de  $fh_0$ . Il est vraisemblable que les protons présents dans le rayonnement sont en grande majorité en dehors de la bande d'énergie que nous avons considérée, la correction est donc probablement de faible importance.

## CONCLUSION

Nous pouvons tirer des résultats obtenus les conclusions suivantes :

1° Les chiffres que nous avons trouvés pour l'altitude de formation des mésons montrent qu'elle est notablement plus basse que celle admise jusqu'ici, surtout qu'ils définissent une altitude MOYENNE, le phénomène se poursuivant à des altitudes inférieures à celles-ci.

Ce fait est en accord avec les clichés obtenus récemment, à la chambre de Wilson, par divers auteurs (100) à (102) (116) (117) à des altitudes variant de 4,3 à 9,5 km, montrant des créations de mésons par paires ou multiples.

2° L'hypothèse de masses multiples du méson (59) à (61) n'est pas infirmée, mais elle ne paraît pas nécessaire pour expliquer les différentes valeurs de  $\tau_0$  trouvées par les divers expérimentateurs. Il semble qu'à l'heure actuelle on doive rechercher la cause de tels écarts dans des effets de diffusions des écrans, ou de gerbes, ainsi que dans des variations de la hauteur de production avec l'énergie. Bien que les mesures de la masse du méson soient assez dispersées elles ne semblent pas actuellement assez précises pour que l'on ait par ailleurs la preuve directe de masses multiples ou variables du méson.

3° Malgré des erreurs probables importantes, il semble que la hauteur de production du rayonnement croisse avec son énergie ; la méthode des points correspondants indiquée ici, reprise à la lumière de ce travail, en étudiant de plus près en particulier l'effet de diffusion des écrans, doit permettre, jointe à de nouvelles mesures directes de  $\tau_0$ , de déterminer avec précision la hauteur de formation du rayonnement en fonction de l'énergie, résultats qui permettront d'obtenir des renseignements sur le ou les mécanismes possibles de production des mésons.

En terminant, je tiens tout d'abord à rappeler le souvenir de Paul Ehrenfest en compagnie de qui ce travail a été commencé. Que sa famille veuille bien trouver ici l'assurance qu'il est toujours présent dans l'esprit de chacun de nous. Sa belle intelligence a laissé une impression profonde sur tous ceux qui l'ont connu et ses qualités morales exceptionnelles leur sont un exemple et un guide.

J'exprime toute ma gratitude à M. le Professeur Pierre Auger à qui je dois le sujet de ce travail et qui n'a cessé de m'assister de ses encouragements et de ses conseils.

J'honore la mémoire de M. le Professeur Jean Perrin et remercie MM. les Professeurs Eugène Bloch, Bruhat et Von Muralt pour l'accueil et les facilités de travail qu'ils m'ont réservés dans leurs laboratoires.

Mes recherches ont pu être effectuées grâce aux subventions du Centre National de la Recherche Scientifique, auquel j'exprime ma reconnaissance.

Ce travail a été grandement facilité par la parfaite camaraderie qui règne parmi les travailleurs dirigés par M. Pierre Auger, qu'ils en soient tous remerciés.

## BIBLIOGRAPHIE

1. ROSSI. — *La Ricerca Scientifica* (1932), **3**, n° 7.
2. ROSSI. — *Naturwiss.* (1932), **20**, 403.
3. CLAY et LEVERT. — *Physica* (1942), **9**, 158.
4. AUGER, LEPRINCE-RINGUET, EHRENFEST. — *C. R. Paris* (1935), **200**, 1747.
5. ANDERSON. — *Phys. Rev.* (1932), **41**, 405.
6. ANDERSON. — *Phys. Rev.* (1933), **43**, 368.
7. ANDERSON. — *Phys. Rev.* (1933), **43**, 491.
8. ANDERSON. — *Phys. Rev.* (1933), **44**, 406.
9. CLAY et BERLAGE. — *Naturwiss.* (1932), **20**, 687.
10. CLAY. — *Proc. Roy. Acad. Amsterdam* (1928), **31**, 1091.
11. CLAY. — *Proc. Roy. Acad. Amsterdam* (1930), **33**, 711.
12. COMPTON. — *Phys. Rev.* (1932), **41**, III et 681.
13. BENNET. — *Phys. Rev.* (1932), **42**, 446.
14. COMPTON. — *Nature* (1933), **131**, 713.
15. COMPTON. — *Phys. Rev.* (1933), **43**, 387.
16. ALVAREZ et LEPRINCE-RINGUET. — *C. R. Paris*, (1933), **497**, 1242.
17. ALVAREZ et COMPTON. — *Phys. Rev.* (1933), **43**, 635.
18. AUGER et LEPRINCE-RINGUET. — *Nature* (1934), **133**, 138.
19. JOHNSON. — *Phys. Rev.* (1933), **44**, 856 (1934), **45**, 569.
20. ROSSI. — *Phys. Rev.* (1934), **45**, 212.
21. EHMERT. — *Phys. Zeit.* (1934), **35**, 20.
22. BLACKETT. — *Proc. Roy. Soc.* (1937), **159**, 1.
23. LEPRINCE-RINGUET et CRUSSARD. — *C. R. Paris* (1937), **204**, 112.
24. MOTH SMITH. — *Phys. Rev.* (1932), **39**, 403.
25. EHRENFEST. — *C. R. Paris* (1938), **207**, 573.
26. FOLLET et CRAWSHAW. — *Proc. Roy. Soc.* (1936), **A 155**, 546.
27. BRACKERTZ. — Thèse de Doctorat. Berlin (1936).
28. AUGER, EHRENFEST, FRÉON et FOURNIER. — *C. R. Paris* (1937), **204**, 257.
29. STÖRMER. — *Zeit. f. Astro. Physik* (1930), **1**, 237 (1931), **3**, 31.
30. BLOCH F. — *Zeit. f. Physik* (1933), **81**, 363.
31. FERMI. — *Phys. Rev.* (1939), **56**, 1242 ; (1940), **57**, 485.
32. COSYNS. — *Bull. Techn. Ing.* E. P. Bruxelles (1936), **173**.
33. MAZE. — *J. de Phys.* (1938), **9**, 162.
34. MAZE. — Thèse de doctorat Paris (1941).
35. EHRENFEST et FRÉON. — *C. R. Paris* (1938), **207**, 853.

36. EHRENFEST et FRÉON. — *J. de Phys.* (1938), **9**, 529.
37. YUKAWA. — *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* (1935), **17**, 48.
38. BHABHA. — *Nature* (1938), **141**, 117.
39. YUKAWA et Collab. — *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* (1938), **20**, 319 et 720.
40. KÜNDZE. — *Zeit. f. Physik* (1933), **83**, 10.
41. ANDERSON et NEDDERMEYER. — *Phys. Rev.* (1938), **54**, 88; (1936), **50**, 270.
42. EHRENFEST. — *C. R. Paris* (1938), **206**, 428.
43. STREET et STEVENSON. — *Phys. Rev.* (1937), **52**.
44. WILLIAMS et PICKUP. — *Nature* (1938), **141**, 684.
45. CORSON et BRODE. — *Phys. Rev.* (1938), **53**, 215.
46. RUHLIG et CRANE. — *Phys. Rev.* (1938), **53**, 266.
47. ROSSI et DE BENEDETTI. — *Ricerca Scientifica* (1934), **5**, 590.
48. EHMERT. — *Zeit. für Physik* (1937), **106**, 751.
49. EULER. — *Zeit. für Physik* (1938), **110**, 450 et 692.
50. EULER et HEISENBERG. — *Erg. der Exacten Naturwiss.* (1938), **17**, 1.
51. LEPRINCE-RINGUET et Collab. — *J. de Phys.* (1941), **8**.
52. GORODETZKY. — *Thèse de Doctorat Paris* (1942).
53. NISHINA TAKEUCHI et ICHIMYA. — *Phys. Rev.* (1937), **52**, 1192.
54. NISHINA TAKEUCHI et ICHIMYA. — *Phys. Rev.* (1939), **55**, 517.
55. MAIER LEIBNITZ. — *Zeit. für Physik* (1939), **12**, 569.
56. WILSON J. G. — *Proc. Roy. Soc.* (1939), **172**, 517.
57. HUGUES. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 414.
58. ANDERSON et NEDDERMEYER. — *Int. Conf. Phys. London* (1934), 171.
59. NEDDERMEYER. — *Phys. Rev.* (1938), **53**, 102.
60. WEISZ. — *Phys. Rev.* (1939), **55**, 1266.
61. WEISZ. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 845.
62. POMERANTZ. — *Phys. Rev.* (1940), **57**, 3.
63. COCCONI. — *Phys. Rev.* (1940), **57**, 61.
64. MONTGOMERY et MONTGOMERY. — *Phys. Rev.* (1936), **50**, 975.
65. CLAY et VAN GEMERT. — *Physica* (1939), **6**, 649.
66. ROZENTHAL. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 612.
67. ROSSI. — *Rev. Modern Phys.* (1939), **11**, 296.
68. TRUMPY et ORLIN. — *Archiv for Math. og. Naturvidenskabern* (1941), **44**.
69. TRUMPY et UBISH. — *Archiv for Math. og. Naturvidenskabern* (1941), **44**.
70. ROSSI, HILBERRY et HOAG. — *Phys. Rev.* (1940), **57**, 461.
71. WILLIAMS. — *Proc. Roy. Soc.* (1939), **172 A**, 194.
72. HAYDN JONES. — *Rev. Modern Phys.* (1939), **11**, 235.
73. BRUINS. — *Proc. Roy. Acad. Amsterdam* (1939), **42**, 54.
74. BRUINS. — *Proc. Roy. Acad. Amsterdam* (1939), **42**, 740.
75. ROSSI. — *Phys. Rev.* (1940), **57**, 469.
76. NORDHEIM. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 554.
77. WEISZ. — *Naturwiss.* (1939), **27**, 132.
78. NIELSEN, RYERSON, NORDHEIM et MORGAN. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 547.
79. RASETTI. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 613.
80. RASETTI. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 706.
81. RASETTI. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 198.
82. SNYDER. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 1043.
83. ISKRAUT. — *Zeit. für Physik* (1941), **118**, 181.
84. HESS et BENEDETTO. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 610.
85. BOHR. — *Phil. Mag.* (1913), **25**, 10; (1915), **30**, 581.
86. BETHE. — *Zeit. für Physik* (1932), **76**, 293.
87. HOENL. — *Zeit. für Physik* (1933), **84**, 1.
88. JOHNSON et POMERANTZ. — *Phys. Rev.* (1939), **55**, 104.
89. ROSSI. — *Phys. Rev.* (1940), **57**, 660.

90. WILSON J. G. — *Proc. Roy. Soc.* (1940), **174**, 73.
  91. CODE. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 229.
  92. WILLIAMS. — *Phys. Rev.* (1940), **58**, 292.
  93. BLACKETT. — *Nature* (1938), **142**, 992.
  94. BARNOTHY et FORRO. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 154.
  95. AUGER, MAZE et CHAMINADE. — *C. R. Paris* (1941), **213**, 381.
  96. MAZE et CHAMINADE. *C. R. Paris* (1942), **214**, 266.
  97. STREET, WOODWARD et STEVENSON. *Phys. Rev.* (1935), **47**, 891.
  98. CLAY, WIERSMA et JONKER. — *Physica* (1940), **7**, 673.
  99. CLAY, WIERSMA et JONKER. — *Proc. Roy. Akad. Amsterdam* (1938), **41**, 706.
  100. HERZOG. — *Phys. Rev.* (1940), **57**, 337.
  101. HERZOG et BOSTIK. — *Phys. Rev.* (1940), **58**, 578.
  102. HUGUES. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 414.
  103. FEDORENKO. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 461.
  104. SWANN. — *J. Franklin Inst.* (1941), **231**, 86.
  105. SIEBERT. — *Zeit. für Physik* (1941), **118**, 217.
  106. BERNARDINI, WICK, CONVERSI et PANCINI. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 535.
  107. SWANN. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 770.
  108. SWANN. — *Phys. Rev.* (1941), **60**, 470.
  109. COCCONI. — *Phys. Rev.* (1941), **66**, 533.
  110. NORDHEIM L. W. et NORDHEIM G. — *Phys. Rev.* (1938), **54**, 254.
  111. WILLIAMS. — *Proc. Roy. Soc.* (1932), **135**, 108.
  112. MÖLLER. — *Ann. Physik* (1932), **14**, 531.
  113. ROSSI et HALL. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 223.
  114. BEARDSLEY. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 402.
  115. OPPENHEIMER. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 462.
  116. HERZOG. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 117.
  117. HERZOG et BOSTICK. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 122.
  118. VEKSLER et DOBRIOTIN. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 1044.
  119. HILBERRY. — *Phys. Rev.* (1941), **59**, 763.
  120. FRÉON. — *C. R. Paris*, 19-10-1942.
-



## DEUXIÈME THÈSE

---

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

**Les orages magnétiques,  
théorie de Chapman et Ferraro,  
leur corrélation avec l'intensité du  
rayonnement cosmique.**

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 21 Octobre 1942.

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*  
PAUL MONTEL.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

*Le Recteur de l'Académie de Paris,*  
GILBERT GIDEL.





